



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL MECÁNICO

Título del proyecto:

DESARROLLO DE TUBOS DE COLA FLEXIBLES PARA
SISTEMAS DE ESCAPE

Miguel García-Barberena Labiano

Tutor: Antonio Lumbreras Azanza

Pamplona, Abril de 2010



0. CONTENIDOS

1. DEFINICIÓN DEL PROYECTO	3
1.1 OBJETO DEL PROYECTO	3
1.2 METODOLOGÍA.....	3
2. INTRODUCCIÓN A LA EMPRESA	5
2.1 EMCON TECHNOLOGIES	5
2.2 PLANTA DE ORCOYEN.....	7
2.2.1 Unidades de Negocio Integradas (UNIs).....	10
2.2.2 Mantenimiento.....	12
2.2.3 Administración	13
2.2.4 Recursos Humanos	13
2.2.5 Control de Proyectos	14
2.3 CENTRO TÉCNICO.....	14
2.3.1 Ingeniería de Diseño.....	15
2.3.2 Taller de Prototipos	16
2.3.3 Área de Ensayos	17
3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ESCAPE.....	19
3.1 PARTE CALIENTE.....	20
3.2 PARTE FRÍA	24
4. ESPECIFICACIONES	30
5. CONCEPTO Y DISEÑOS PRELIMINARES	32
5.1 CONCEPTO DE TUBO DE COLA FLEXIBLE.....	32
5.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE REFERENCIA	34
5.3 PROPUESTAS DE DISEÑO	38
5.3.1 Propuesta del cliente.....	38
5.3.2 Primera alternativa.....	41
5.3.3 Segunda alternativa.....	45
4.4 MATERIALES EMPLEADOS.....	47
4.5 PLANIFICACIÓN DE ACTIVIDADES Y ESTIMACIÓN DE COSTES	50
6. SIMULACIÓN DE LA RESPUESTA ANTE UN IMPACTO	54
6.1 HERRAMIENTAS EMPLEADAS	54
6.2 METODOLOGÍA DEL PROCESO DE SIMULACIÓN	56
6.2.1 Preparación de la geometría y materiales	56
6.2.2 Mallado.....	60
6.2.3 Condiciones de contorno, contacto y parámetros de cálculo.....	69
6.3 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	73
6.3.1 Verificación del modelo	73
6.3.2 Obtención de resultados y optimización.....	78
6.4 CONCLUSIONES.....	90
7. ENSAYO DE IMPACTO SOBRE TUBO DE COLA.....	91
7.1 EQUIPO DE ENSAYO, DISPOSICIÓN Y MUESTRAS.....	91
7.2 DESARROLLO DEL ENSAYO.....	98



7.3 RESULTADOS OBTENIDOS	101
7.4 CONCLUSIONES.....	108
8. ENSAYO DE ACÚSTICA PARA RUIDO DE COLA	110
8.1 REQUISITOS ACÚSTICOS PARA UN SISTEMA DE ESCAPE.....	110
8.2 EQUIPO DE ENSAYO, DISPOSICIÓN Y MUESTRAS.....	112
8.3 DESARROLLO DEL ENSAYO.....	117
8.4 RESULTADOS OBTENIDOS	120
8.5 CONCLUSIONES.....	127
9. LINEAS FUTURAS DE TRABAJO Y LECCIONES APRENDIDAS	128
9.1 LINEAS FUTURAS DE TRABAJO	128
9.2 LECCIONES APRENDIDAS.....	129
10. BIBLIOGRAFÍA	132



1. DEFINICIÓN DEL PROYECTO

La industria del automóvil ha desarrollado en los últimos años una creciente preocupación por la seguridad en la automoción, que se ha traducido en niveles de exigencia cada vez mayores y grandes inversiones dedicadas al desarrollo de multitud de sistemas de seguridad activa y pasiva. Una de las líneas de trabajo en este ámbito es la del estudio de los fenómenos de choque, analizando cada componente que pudiera verse involucrado y de algún modo poner en riesgo la seguridad de los ocupantes del vehículo. Así, el sistema de escape juega un papel importante en un accidente por alcance trasero, puesto que puede interferir con el eje trasero o con el depósito de combustible, aumentando notablemente el riesgo de incendio. Es necesario reducir al mínimo la probabilidad de interferencia, diseñando sus elementos de manera que se produzcan menores deformaciones en estas zonas conflictivas y se transmita la menor cantidad de esfuerzo a otras partes del automóvil.

Además, las exigencias del consumidor en cuanto a calidad, fiabilidad y servicio van en aumento. Resulta interesante estudiar el modo de minimizar los gastos de mantenimiento y reparación del automóvil, máxime cuando tanto empresas como consumidores se ven afectados por una crisis económica global. Una estrategia adecuada en este sentido es estudiar el modo de garantizar que el fallo o rotura de un componente no tenga un impacto significativo sobre el funcionamiento general del vehículo, provocando el menor daño posible en el resto de sus elementos. Así se reduce la necesidad de cierto tipo de recambios, y se simplifican las operaciones de mantenimiento o sustitución.

1.1 OBJETO DEL PROYECTO

El objeto del presente proyecto es validar de manera preliminar el diseño de un tubo de salida que minimice la transmisión de esfuerzos al resto del silencioso. Se tomará como base de partida el sistema de referencia del cliente para investigaciones de choque, y la propuesta de éste para el diseño del nuevo tubo de cola. Así mismo, se tomarán los diseños preliminares alternativos de la empresa y se estudiará el comportamiento de cada uno ante un impacto por alcance trasero.

1.2 METODOLOGÍA

Para estudiar la respuesta de cada diseño ante el impacto, se emplearán herramientas computacionales de simulación que permiten analizar el comportamiento



de dichos componentes antes de su fabricación. Así se determinará cuál es el diseño que mejor responde a dicha situación y en caso de ser necesario se añadirán las modificaciones que se crean convenientes para su optimización. Posteriormente se verificarán los resultados mediante un ensayo de choque. Además se comprobará la validez del diseño con respecto a uno de los requerimientos fundamentales de cualquier sistema de escape, la reducción de contaminación acústica. Es necesario comprobar que el nuevo componente no modifica sustancialmente el ruido emitido, para lo cual se realizará un ensayo de acústica sobre ruido de cola.

Finalmente, a la vista de los datos obtenidos, se analizarán algunos aspectos secundarios del diseño, realizando las propuestas que se crean convenientes para la mejora del mismo y estableciendo las líneas futuras de actuación.

2. INTRODUCCIÓN A LA EMPRESA

El presente proyecto ha sido realizado dentro del marco de prácticas laborales de la universidad. Así pues, se ha contado con el respaldo y los medios de una empresa dedicada específicamente a este tipo de trabajos. La práctica se desarrolló en el área de ensayos perteneciente al Centro Técnico de la planta. A continuación se realiza una descripción de la empresa y su metodología de trabajo.

2.1 EMCON TECHNOLOGIES

EMCON Technologies es una de las más importantes empresas mundiales dedicadas al control y tratamiento de emisiones dentro del sector de la automoción. Cuenta aproximadamente con 6700 empleados y opera desde 18 países, suministrando a fabricantes de automóviles, de vehículos industriales y de motores distribuidos por todo el mundo.

Oficialmente, EMCON Technologies nació el 17 de Mayo de 2007, cuando el grupo de inversión de capital One Equity Partners compró la parte dedicada a emisiones del grupo ArvinMeritor. A continuación se expone el logotipo actual de la empresa.



Fig 2.1 Logotipo actual de la empresa

EMCON Technologies lleva varias décadas desarrollando sistemas de control y tratamiento de emisiones, y es una compañía pionera en dicho campo. Introdujo el primer convertidor catalítico para vehículos de pasajeros en el año 1974, sistema que actualmente obligatorio según la legislación de muchos países. También fue la primera compañía en desarrollar la fabricación en serie de sistemas de escape realizados con materiales como el acero inoxidable, y posteriormente, el titanio.

Como una de las fundadoras en el post-tratamiento de emisiones, ha sido reconocida por su contribución a la reducción de contaminación del Medio Ambiente gracias a su capacidad para ofrecer productos con mayor eficiencia, calidad y rendimiento para el equipamiento original de fabricantes de motores y vehículos.

A lo largo de este tiempo, EMCON Technologies ha ideado y producido sistemas de control de emisiones cada vez más eficientes. Así, ofrece distintas soluciones para el tratamiento de gases polucionantes y de ruido, tales como sistemas de Reducción Catalítica Selectiva (SCR), filtros de partículas diesel (DPF o FAP), sistemas de regeneración térmica, catalizadores y resonadores tipo “spun”, o marmitas de modo dual para silenciosos.



Fig 2.2 *Marmita Dual-Mode y Sistema de Reducción Catalítica Selectiva*

Estos productos se distribuyen a lo largo de todo el mundo a los fabricantes más importantes como son General Motors, Ford y DaimlerChrysler en América; PSA, Renault, Volkswagen y Fiat en Europa; o Toyota y Hyundai en el continente asiático, entre otros.

A diferencia de otros proveedores, EMCON Technologies no depende un único cliente, mercado, o región geográfica, lo que le otorga a largo plazo una importante ventaja competitiva.

La filial española de EMCON Technologies cuenta con tres plantas de fabricación en el país.

La principal de ellas es la situada en Orcoyen, en la periferia de Pamplona (Navarra). En un principio se destinaba a abastecer únicamente a la fábrica de Volkswagen Navarra, sin embargo en la actualidad lleva a cabo la mayor parte de la producción de España para suministrar a los distintos clientes.

Las otras dos plantas se conocen como “plantas piloto”, puesto que actúan como almacenes intermedios, facilitando las labores logísticas, de organización y secuenciación, además de la manufactura de ciertos componentes y ensamblaje final de algunos subconjuntos que se envían por separado desde Orcoyen. Así pues, se encuentran próximas a las instalaciones donde los fabricantes montan los sistemas de escape en los vehículos, para poder prestar un mejor servicio.

Una planta piloto se encuentra en Martorell (Barcelona) para abastecer a SEAT y la segunda en Almussafes (Valencia), suministrando a la fábrica de Ford en dicha localidad. Además en la República Checa existe otra planta piloto situada en Mlada Boleslav, para cubrir la demanda de las instalaciones de Skoda. Aunque esta última no se encuentra en España, sus funciones y la relación con la planta de Navarra es la misma que la de las otras dos mencionadas.



Fig2.3 Situación de planta principal y plantas piloto

2.2 PLANTA DE ORCOYEN

La planta de EMCON Technologies en Navarra esta construida sobre una extensión de 25.500 m² en el polígono industrial Mendikur de Orcoyen. De esta superficie, aproximadamente 14.000 m² son ocupados por instalaciones industriales,

mientras que el resto son destinados a plazas de aparcamiento y zonas ajardinadas. La parcela acoge tanto a la propia planta de fabricación como al Centro Técnico, que se sitúa en un edificio independiente. Actualmente emplea a unas 280 personas.



Fig 2.4 Localización de la planta de Orcoyen

En origen, la fábrica fue fundada por Fadasa en 1962, y dos años más tarde, en 1964, absorbida por AP Ibérica. Bajo este nombre estuvo funcionando hasta el año 1970, cuando pasó a ser AP Amortiguadores.

Más recientemente, en 1983, TI Cheswick tomó las riendas para después fusionarse con el grupo Arvin Industries Inc., pasando a llamarse Arvin-Cheswick S.A. en 1989. Posteriormente cambió de nuevo para llamarse Arvin Exhaust en 1995.

En el año 2000 tuvo lugar la fusión de dos grandes empresas dedicadas a la fabricación de componentes para el automóvil y los vehículos pesados, Arvin Industries y Meritor Automotive, respectivamente. Así nació el grupo ArvinMeritor, que empleó la planta a través de su división ArvinMeritor Emissions Technologies hasta que en el año 2006 dicha alianza tomara la decisión abandonar el mercado de los sistemas de escape, vendiendo esta división al grupo One Equity Partners, que le dio el nombre EMCON Technologies.

El trabajo de la planta de Orcoyen se enmarca en las áreas de Emisiones de Vehículos Ligeros y Emisiones de Vehículos Comerciales. Así, se fabrican sistemas completos de escape para su venta directa al constructor de automóviles, y también

diversos subconjuntos y componentes, tales como marmitas, tubos intermedios, silentblocks ó catalizadores.

La producción se distribuye entre 15 marcas de automóviles, con predominio de las pertenecientes al consorcio VW AG, Volkswagen, SEAT, Skoda y Audi, que acaparan aproximadamente el 50% de las ventas. Seguidamente destacan Peugeot y Citroën, del grupo PSA, y Ford, que suponen un 20% adicional. El resto se divide entre otras marcas como Renault, BMW, Toyota, Nissan e Iveco.



Fig 2.5 Distribución geográfica de principales clientes en Europa

Esta planta cuenta con los más estrictos parámetros de calidad, seguridad, y respeto por el medio ambiente, cumpliendo con las normativas ISO/TS 16949 (adaptación de la ISO 9001 de Calidad para el sector automovilístico) e ISO 14001, de Medio Ambiente.

El personal de EMCON Technologies está dividido en diferentes áreas de trabajo que interactúan entre sí para lograr la consecución de los objetivos marcados. Se distinguen las siguientes:

1. Unidades de Negocio Integradas (UNIs)
2. Mantenimiento
3. Administración
4. Recursos Humanos
5. Control de Proyectos
6. Centro Técnico.

2.2.1 Unidades de Negocio Integradas (UNIs)

La estructura matricial de la empresa queda representada por estos equipos de trabajo multidisciplinares, que engloban las funciones de ingeniería de manufactura, calidad, logística y producción. Así, el personal que trabaja en ellas pertenece al mismo tiempo a una UNI y a un departamento concreto.

Las UNIs se configuran de modo que cada una controla y presta apoyo a una serie de células de fabricación, en función del cliente y el tipo de producto a fabricar. Actualmente existen 5 UNIs, que son las siguientes:

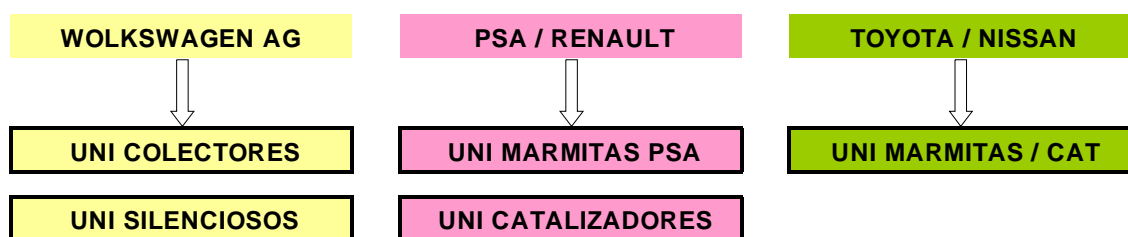


Fig 2.6 Unidades de Negocio Integradas

Este sistema organizativo hace énfasis en la flexibilidad y la comunicación entre el personal de distintos departamentos, así como en la implicación de sus trabajadores en la consecución de los objetivos comunes.

De este modo se consigue una mayor eficacia en la resolución de los problemas diarios y en el proceso de mejora continua. Dentro de cada UNI se designa un Líder,

que además de sus funciones propias actúa como coordinador y facilitador del equipo, transmitiendo al resto los objetivos impuestos por la dirección y gestionando los recursos en función de éstos. El organigrama, de forma esquemática, así como las funciones de los departamentos correspondientes, se muestran a continuación:

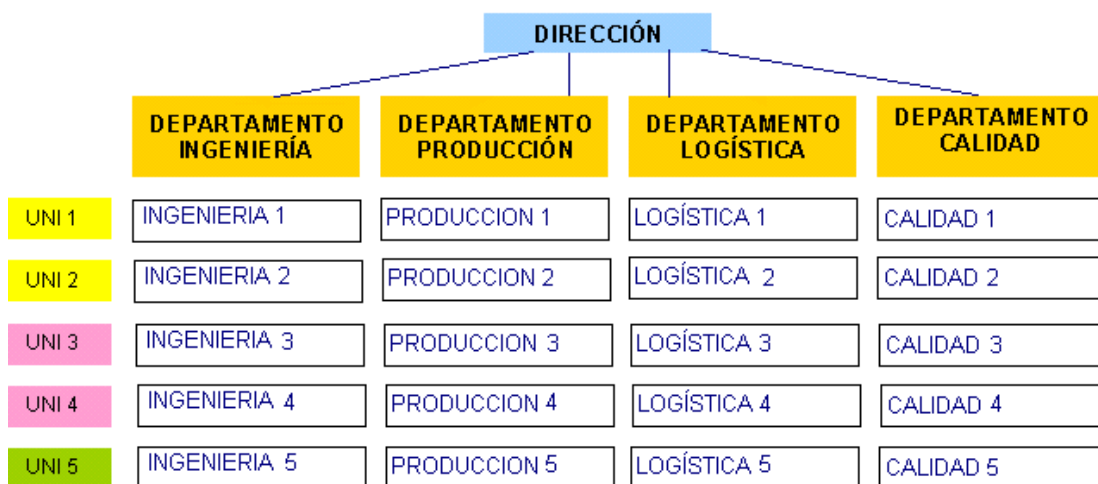


Fig 2.7 Organigrama de estructura matricial

Departamento de Producción:

- Organización de los recursos de personal disponibles de acuerdo a la demanda, y formación de dicho personal.
- Comunicación de los objetivos a los operarios, e información acerca de problemas comunes y soluciones adecuadas.
- Control de los resultados y decisión sobre las acciones correspondientes.

Departamento de Ingeniería:

- Estudio de factibilidad de nuevos productos, definición de procesos para su fabricación, implantación, seguimiento y mejora continua.
- Estudio y elaboración de puestos de trabajo, metodología de actuación, tiempos de ciclo.
- Definición, aprobación e implantación de nueva maquinaria y utillaje, desarrollo de métodos de control.
- Documentación relativa a cada célula de fabricación.



Departamento de Calidad:

- Definición e implantación de controles y registros necesarios para asegurar la calidad del producto; edición, aprobación y distribución de la documentación referente al Sistema de Calidad y Medio Ambiente.

- Seguimiento y control del gasto generado por producto defectuoso.

- Realización periódica de auditorías de proceso y producto.

- Análisis y corrección de las no conformidades declaradas por el cliente.

Departamento de Logística:

- Recepción de las necesidades de producción programadas por el cliente.

- Planificación de las necesidades de mano de obra y materias primas necesarias para la fabricación programada.

- Control del nivel de stock.

- Suministro de producto al cliente, optimización de los recursos de transporte y almacenamiento.

Los distintos departamentos llevan a cabo reuniones cada 3 o 4 semanas para optimizar la planificación, mediante el análisis de los problemas o mejoras del pasado, la situación actual y las directrices que marcan la línea de trabajo en el futuro a medio plazo.

Por otro lado, las UNIs realizan breves reuniones diarias a primera hora de la mañana, y cada 6 meses deben presentar a través de su líder un balance de resultados a la dirección, para poder compararlo con los objetivos marcados y tomar decisiones sobre las acciones necesarias y los objetivos siguientes.

2.2.2 Mantenimiento

El personal de Mantenimiento lleva a cabo múltiples tareas que se pueden clasificar en dos grandes grupos de acciones: acciones preventivas y acciones correctivas.

El mantenimiento preventivo consiste en asegurar el correcto funcionamiento de todas las máquinas e instalaciones con el fin de evitar la aparición de problemas en el



futuro. Éste se planifica teniendo en cuenta el número de máquinas de cada célula, la complejidad de las mismas, y el historial de pérdidas de tiempo efectivo de producción registrado debido a paradas de máquina no planificadas.

El mantenimiento correctivo consiste en la solución de problemas imprevistos y reparación de averías ocurridas.

Otras tareas son: Instalación de elementos de seguridad, instalación de nuevos equipos o modificación de los existentes, aseguramiento de disponibilidad de recambios, provisión de servicio de electricidad, agua, aire comprimido, etc.

2.2.3 Administración

Las funciones que desempeña el personal de Administración son las de compras, tesorería y contabilidad. Se controlan los resultados económicos obtenidos y el patrimonio de la empresa, y en contacto con la dirección se elabora un plan financiero según el cual se enfocará el trabajo, con el objetivo de mejorar resultados anteriores.

El responsable de compras ha de ser quien pida por primera vez a los distintos proveedores las piezas que todavía no hayan entrado en la producción en serie, y que, una vez recibidas sus correspondientes homologaciones, se incluirán en el plan logístico.

Así mismo, empleados de este departamento realizan los trámites correspondientes de facturas y albaranes para bienes adquiridos o vendidos por la empresa.

2.2.4 Recursos Humanos

El departamento de Recursos Humanos es el encargado de sacar el máximo provecho del capital humano de la empresa. Así pues, evalúa las necesidades de personal en cada momento y si es preciso realiza el proceso de oferta de puestos de trabajo, con la posterior evaluación, selección y contratación de candidatos.

Además también es su misión asegurar que cada trabajador desempeña adecuadamente su tarea, mediante la atención hacia sus necesidades y la formación de éste. Además deberá mediar en la resolución de conflictos, y mantener así mismo contacto tanto con la dirección como con los sindicatos de cara a pactar una determinada estrategia de trabajo.



2.2.5 Control de Proyectos

Desde esta área se asegura la entrada de nuevos proyectos a la empresa, y también se controlan y evalúan los proyectos que ya están en marcha.

La adjudicación de nuevos proyectos puede provenir de un cliente nuevo, o bien, como suele ser habitual en la mayoría de los casos, se trata de contratos relativos a la fabricación de un nuevo producto para un cliente actual. La función comercial que desempeña Control de Proyectos incluye también el análisis de rentabilidad para la empresa, realizando cálculos y predicciones a largo plazo, puesto que suelen mediar aproximadamente dos años entre la adjudicación del nuevo trabajo y el comienzo de la producción.

Respecto a las tareas de control sobre los proyectos existentes, es especialmente importante el seguimiento de las inversiones, para aplicar acciones correctoras o posibles mejoras que aumenten la rentabilidad, así como la evaluación de modificaciones en el diseño del producto o el proceso en cuestión.

2.3 CENTRO TÉCNICO

El Centro Técnico es la parte de la empresa dedicada a investigación y desarrollo. Es un centro de diseño donde se conciben los futuros productos a fabricar, adecuándose a los requerimientos del cliente.

Está situado en un edificio independiente pero dentro de la misma parcela, y cuenta con una plantilla de 25 empleados. El Centro Técnico alberga cuatro áreas de trabajo diferenciadas: Ingeniería de diseño, Prototipos, Ensayos y Metrología. Ésta última no pertenece estrictamente al Centro Técnico pero está ubicada en el mismo, y su misión es la de realizar verificaciones dimensionales sobre diversas piezas en fabricación, así como utillajes empleados en el proceso.



Fig 2.89 Centro Técnico de Orcoyen

2.3.1 Ingeniería de Diseño

El área de Ingeniería de Diseño emplea a la mayor parte de la plantilla. Su función es la de definir los nuevos productos así como las modificaciones que puedan llevarse a cabo en los ya existentes, controlando todo el proceso en cada proyecto, desde la cotización inicial hasta la fabricación en serie.

Para ello, el trabajo se divide entre diversos líderes de proyecto según cuál sea el cliente y la parte del sistema a desarrollar, dado que habitualmente se diseña en base a productos ya existentes, sacando así el mayor provecho al conocimiento acumulado. Los líderes de proyecto son quienes mantienen una relación más estrecha con el cliente y también con el resto de departamentos de la empresa, formando también parte de las Unidades de Negocio Integradas descritas anteriormente.

Para optimizar el proceso de diseño, se emplean herramientas informáticas de CAM, fabricación asistida por ordenador. Además, existen dos grupos de trabajo formados por especialistas en el uso de las herramientas CAD y CAE, diseño e ingeniería asistidos por ordenador, respectivamente.



El primer grupo tiene por misión definir la geometría del producto en desarrollo, mediante la realización de modelos en tres dimensiones realizados con programas como CATIA v5, así como dibujar los planos correspondientes a dichas piezas. Así pues, se discute con los líderes de proyecto acerca de cuál será a priori el diseño más adecuado a los requerimientos y posteriormente se van introduciendo multitud de pequeñas modificaciones para lograr el más satisfactorio para el cliente y la empresa. Generalmente, entre otros datos, el cliente envía los modelos correspondientes a los bajos del vehículo en cuestión, que sirven como punto de partida.

La misión de los especialistas de CAE es la de realizar simulaciones en diversos campos que permitan conocer, sin necesidad de fabricar piezas, la respuesta del diseño en determinadas condiciones. Así es posible determinar cuáles son más adecuados, cuáles son los puntos débiles y el modo de proceder a la hora de realizar modificaciones.

Fundamentalmente, se estudian la acústica, contrapresión y durabilidad de los sistemas en desarrollo, para lo cual se emplean diversos programas como pueden ser los siguientes: Flowmaster, GT-Power, WAVE, Abaqus, etc. Los resultados otorgados por estas predicciones permiten hacerse una primera idea que habrá de verificarse posteriormente mediante la fabricación de prototipos y realización de diversos ensayos sobre los mismos.

2.3.2 Taller de Prototipos

El taller de Prototipos es donde se fabrican las diversas variantes del diseño durante el desarrollo de un producto. Las piezas aquí fabricadas se emplean en la realización de bucles internos de desarrollo, mediante ensayos que medirán sus capacidades en las condiciones más semejantes a las de servicio. Además, se crean también prototipos para enviar como muestras al cliente en cuestión que puede así mismo realizar los análisis y ensayos que crea convenientes.

Para ello, se cuenta con las herramientas necesarias para completar todo el proceso de fabricación: curvadora, cerradora, herramientas de corte, taladros, máquinas de soldadura, máquinas de calibrado de tubos, utillajes de posicionamiento, medidor de fugas, etc. De este modo, se consigue mantener una producción independiente de fábrica, con su flujo de material, planificación y logística propios, aunque no obstante, en ocasiones es necesario importar algunos recursos de la misma.



Tanto los medios disponibles como el método de fabricación empleado en Prototipos difieren de los que más adelante serán empleados en la fabricación en serie de un producto, así pues, se trata de una confección mucho más artesanal. En ciertas ocasiones, éste es un factor a tener en cuenta al analizar los resultados de los ensayos, puesto que pese a la gran calidad habitualmente obtenida en los prototipos, las diferencias con la pieza final pueden ser determinantes para la prueba.

2.3.3 Área de Ensayos

En el área de Ensayos se realizan constantes pruebas sobre las diferentes variantes del diseño de un producto que permiten analizar su comportamiento en condiciones similares a las de servicio, o más severas, para garantizar su validez o introducir mejoras en el mismo.

Dentro del conjunto de ensayos a los que habitualmente se somete a los prototipos, los más destacados son los siguientes:

- Acústica y contrapresión: son los fundamentales y los que dan la primera idea sobre la validez de un sistema de escape, puesto que uno de los primeros requisitos de un cliente será el de reducir la contaminación acústica a la vez que se garantiza el menor trabajo de escape y por tanto la menor pérdida de potencia entregada por el motor. Este tipo de ensayos se realizan sobre el motor para el cual se desarrolla el producto, o bien sobre el vehículo que monta dicha motorización. Para ello se dispone de bancos dinamométricos que actúan controlando la velocidad o el par sobre el cigüeñal del motor, o bien sobre las ruedas tractivas del vehículo.
- Ensayos de durabilidad-vibraciones: una vez que se consigue alcanzar los requisitos del cliente en cuanto a acústica y contrapresión, es necesario garantizar que los componentes poseerán una vida útil suficiente sin ver mermadas sus capacidades durante la misma. Para ello se somete a las piezas a vibraciones, probando su fiabilidad ante una carga objetivo para un determinado número de ciclos y buscando más adelante la carga de rotura. Estas pruebas se realizan mediante un actuador hidráulico capaz de aplicar grandes cargas con mínimas desviaciones de la función programada.
- Choque térmico y vibración en caliente: debido a las condiciones de servicio que soportará el sistema de escape, se ha de verificar el correcto funcionamiento de



cada componente al estar sometido a altas temperaturas. Una de las misiones del mismo es la de reducir la temperatura de los gases emitidos antes de su contacto con la atmósfera, puesto que ésta puede rondar los 900° C en el colector. Así pues, se somete al sistema a grandes y bruscas variaciones térmicas que buscan estudiar el comportamiento de dilataciones y contracciones, causantes de grandes tensiones y posibles daños graves. Además, componentes como el catalizador o filtro de partículas combinan estos ciclos térmicos con vibraciones para verificar la integridad del conjunto ladrillo-manta-cierre.

Otros ensayos son, por ejemplo, análisis modal experimental para determinar las frecuencias características de ciertos elementos en condiciones de servicio, así como las tensiones y deformaciones máximas para dichas frecuencias; ó pruebas de deformación de los silentblocks de sujeción al chasis.

3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ESCAPE

El sistema de escape es el encargado de evacuar los gases resultantes de la combustión de un motor térmico a la atmósfera. Existen multitud de variantes en función del vehículo al cual se ha de adaptar, y del motor empleado; en todos los casos el sistema de escape debe reducir la velocidad y temperatura de los gases expulsados, así como el ruido generado y la emisión de productos contaminantes, para ajustarse a los niveles reglamentarios permitidos.

La creciente preocupación por la contaminación en todas sus formas, y la adopción de leyes cada vez más restrictivas en este sentido, convierten al sistema de escape en un elemento de gran importancia e interés.

Dicho sistema consta de diversos elementos, como son:

- Colector.
- Catalizadores, Filtros de Partículas, sistemas de regeneración, etc.
- Tubo flexible, tubos intermedios y de cola.
- Marmitas y resonadores.
- Varillas de sujeción y Silentblocks.

Se puede así mismo dividir el sistema en dos partes: “Hot-End” o parte caliente y “Cold-End” o parte fría.

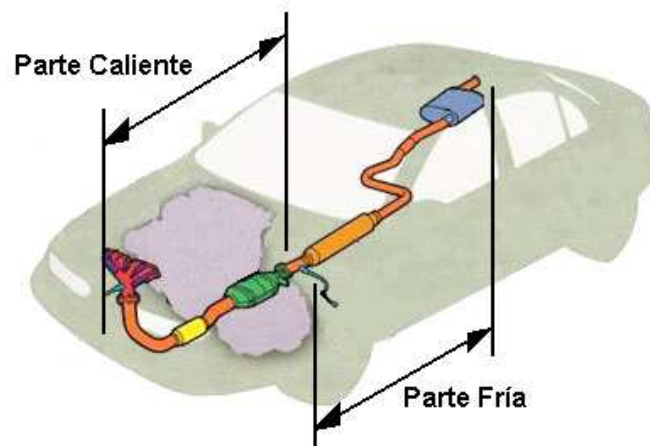


Fig 3.1 Esquema de un sistema de escape

3.1 PARTE CALIENTE

La parte caliente del sistema de escape consta, fundamentalmente, del colector, el flexible y el catalizador. Los motores Diesel también pueden llevar filtro de partículas. Debe su nombre a las altas temperaturas a las cuales está sometida, puesto que es la más próxima al motor, y la que recibe en primer lugar los gases procedentes de la combustión, cuya temperatura puede rondar los 900 ° C.

Colector:

El colector de escape es un entramado de tubos, con uno para cada cilindro, que más adelante se juntan en uno solo. Tras salir a través de las válvulas de escape, el producto de la combustión circula por el colector, que posee una forma determinada estudiada para evitar excesiva turbulencia.



Fig 3.2 Colector

Catalizador:

El catalizador es un elemento a través del cual pasan los gases de escape, produciéndose en ellos una transformación con el fin de ser nocivos en menor medida al salir a la atmósfera.

Los productos de la combustión de un motor térmico convencional, en condiciones ideales, son vapor de agua y dióxido de carbono. Los gases de escape contienen además otros componentes inofensivos, como el nitrógeno. Pero también, dependiendo de las condiciones de funcionamiento del motor, pueden producirse contaminantes como:



- Monóxido de Carbono (CO)
- Óxidos de Nitrógeno (NO_x), fundamentalmente con mezclas pobres, menores que la estequiométrica.
- Hidrocarburos sin quemar (HC), cuando se trabaja con mezclas más ricas que la estequiométrica.
- Partículas, sobretudo en los motores Diesel.

Éstos son productos nocivos para la salud de las personas y por tanto indeseables. Así, en multitud de países existen leyes y normas que regulan su emisión a la atmósfera, estableciendo límites cada vez más severos.

En el convertor catalítico tiene lugar la oxidación de HC y CO, y al mismo tiempo la reducción de NO_x (si se trata de un “catalizador de tres vías”). Esto es, se realiza una reacción que podría decirse de post-combustión, para aproximarse al resultado de la combustión ideal que no es posible conseguir en el motor.

Así pues, el catalizador consiste en un recipiente de acero inoxidable, en ocasiones provisto de una pantalla anticalórica de aluminio, que contiene en su interior un ladrillo o monolito cerámico recubierto por una manta intumescente protectora. El monolito posee una estructura de celdillas con una densidad de éstas que ronda las 70 por centímetro cuadrado.

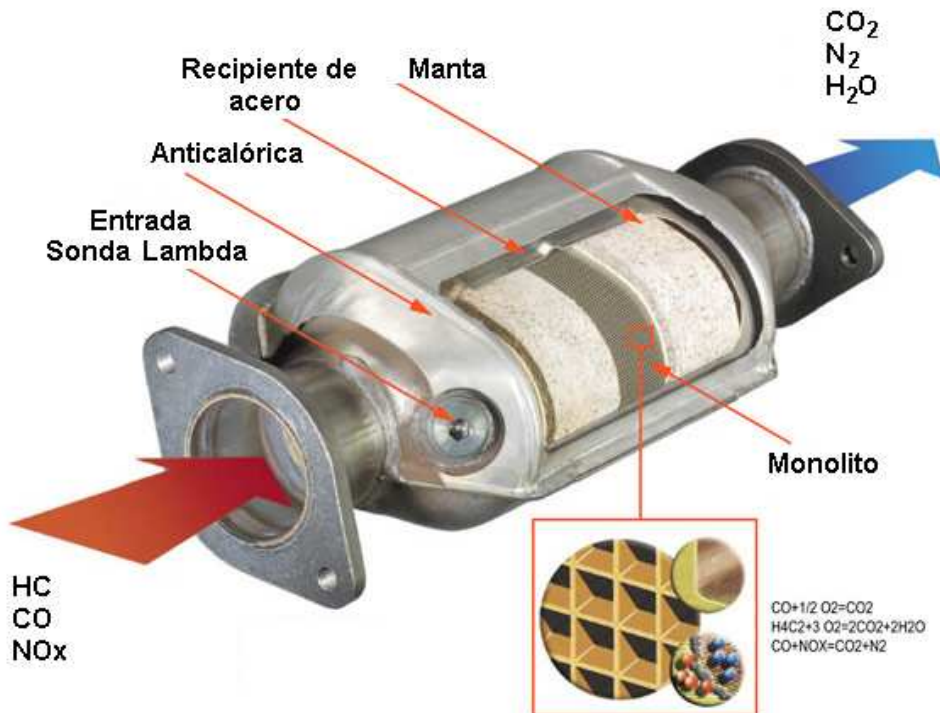


Fig 3.3 Catalizador

La superficie del ladrillo contiene metales preciosos como Platino (Pt) y Paladio (Pd), que actúan como elementos catalizadores de la reacción de oxidación, y Rodio (Rh), que facilita la de reducción. Debido a su estructura y los materiales que lo componen, es un elemento muy costoso.

Para un correcto funcionamiento del catalizador, la temperatura debe ser elevada, y la concentración de oxígeno muy precisa. Para alcanzar esta precisión se dispone de la Sonda Lambda, que mide la diferencia entre la concentración de oxígeno en el aire atmosférico y en los gases de escape antes de entrar al catalizador. Así es posible enviar en cada instante una señal a la Unidad de Control Electrónico para que ésta ajuste con precisión la relación entre aire y combustible que llega al motor.

Filtro de partículas:

En los motores Diesel una de las principales fuentes de contaminación es la emisión de partículas de carbono. Para evitarlo, últimamente se está generalizando el empleo de un dispositivo de estructura similar a un catalizador, el filtro de partículas (DPF o FAP).

A diferencia de un catalizador, el monolito contenido en su interior consta de un patrón opuesto de celdillas en cada extremo, de manera que entre ambos se forman

conductos cerrados que sirven para atrapar la carbonilla, además de reducir también la presencia de otros elementos nocivos y permitir el paso del aire filtrado.

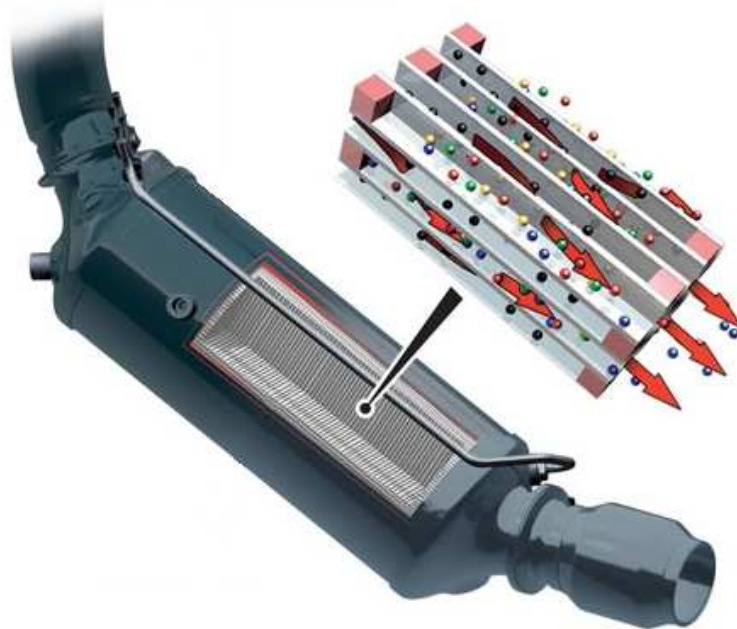


Fig 3.4 Filtro de partículas diesel

A partir de un determinado tiempo de uso, el filtro comienza a obstruirse, dejando de ser efectivo en su función y pudiendo producir también una excesiva resistencia al flujo de gas, que se traduce en una elevada contrapresión y pérdida de potencia del motor. Así pues, es necesario realizar cada cierto tiempo una sustitución del filtro o bien una operación de limpieza del mismo. Actualmente existen diversos sistemas para realizar la limpieza cuando se detecta una contrapresión excesiva, pero se trata de una tecnología en temprano desarrollo. Algunos ejemplos son la post-inyección de gasoil, la programación de secuencias de funcionamiento especiales en la centralita, la inyección de aditivos en el combustible, o indicadores que avisan al conductor para que éste establezca las condiciones necesarias para llevar a cabo la limpieza en marcha.

Subconjunto flexible:

Se trata del componente que separa la parte caliente de la fría, y su cometido es el de evitar la transmisión de vibraciones y esfuerzos entre ambas. Se pretende así

desacoplar el movimiento del motor evitando que produzcan daños en los componentes del silencioso, o a través de sus soportes, en el chasis del vehículo.

Consta de un tubo metálico estanco, con la superficie plegada a modo de fuelle, lo cual le confiere una mayor elasticidad. Además, se recubre mediante una malla de protección térmica y en sus extremos se sueldan sendos casquillos que permitirán el acoplamiento al resto del sistema.



Fig 3.5 Subconjunto Flexible

3.2 PARTE FRÍA

La parte fría del sistema de escape transcurre desde el flexible hasta el tubo de cola, a través del espacio disponible en los bajos del automóvil, y sujeta al chasis de éste mediante varillas y silentblocks, elementos elásticos que amortiguan vibraciones.

Esta parte se conoce habitualmente como “silencioso”, puesto que su misión es la de reducir progresivamente la velocidad, temperatura y presión de los gases que por ella circulan, para minimizar el ruido generado en el contacto con la atmósfera. El silencioso se compone de tubos intermedios, marmitas, tubo de cola y elementos de sujeción:

Tubos intermedios:

Los tubos que transcurren entre el comienzo de la parte fría, las marmitas y el final, tienen la misión fundamental de reducir la temperatura de los gases en su interior. Por ello, son largos y compuestos de materiales conductores como el acero inoxidable.

Un factor importante es el diámetro empleado, que tendrá influencia directa en el valor de la contrapresión y en el nivel de sonoridad. Cuanto mayor sea el diámetro de los tubos intermedios, menor contrapresión habrá, por tanto, menor resistencia a la

salida del gas y menor potencia perdida. Sin embargo, también aumentará el nivel de ruido emitido.

Así pues, para cada motor se ha de tener en cuenta este factor e intentar alcanzar el grado de equilibrio entre contrapresión y sonoridad que resulte más satisfactorio. Por otro lado, habrá que tener en cuenta el recorrido que realizarán los tubos, puesto que las limitaciones geométricas suelen ser importantes al tratarse de un sistema que se agrega a un chasis y bastidor ya definidos.



Fig 3.6 Ejemplo de lay-out de sistema de escape

Marmitas:

Las marmitas son elementos intercalados en el recorrido del gas hacia la salida cuya misión es incidir más profusamente sobre la sonoridad, logrando gran reducción de ruido emitido, y siendo capaces de atenuar frecuencias específicas que resulten especialmente problemáticas o molestas.

Existen multitud de diseños de marmitas en función del vehículo y su motorización, y para generarlos debe prestarse atención a muchas variables: dimensiones, componentes internos, posición, contrapresión, temperatura, vibración, ruido radiado, durabilidad, peso, coste, etc.

Una primera consideración es la que atañe al volumen de la marmita. La longitud de ésta determina el grado de atenuación para una determinada frecuencia, que se puede calcular determinando si el rebote al final de la longitud devolverá ondas en fase o desfase con las incidentes, según frecuencias. La atenuación también es mayor o menor para una frecuencia en función de la relación entre áreas transversales en un cambio de sección.

Los componentes internos también tienen gran influencia y se emplean para realizar un ajuste sonoro (tuning) más preciso:

- Dispositivo de Helmholtz: empleado para atenuar una frecuencia concreta, generalmente en el rango de bajas frecuencias.
- Tubo perforado: produce disipación resistiva por fricción, y reactiva por reflexión; según la porosidad puede ensancharse la banda de atenuación.
- Bypass: Atenúa una frecuencia específica mediante generación de una onda en desfase.
- Material de absorción: reduce el ruido de flujo, y suaviza el sonido emitido. Se emplea Basalto, E-Glass o materiales similares.
- Bean Can: atenúa un rango amplio en alta frecuencia, generalmente se localiza en el tubo de salida.
- Baffles: crean cámaras para conseguir diversos efectos, en ocasiones también presentan perforaciones.



Fig 3.7 Componentes de una marmita de escape

Para definir el diseño de las marmitas se emplean diversos programas de simulación como pueden ser Abaqus o GTPower, y se realizan múltiples ensayos de acústica y contrapresión en un proceso iterativo hasta conseguir los efectos deseados.

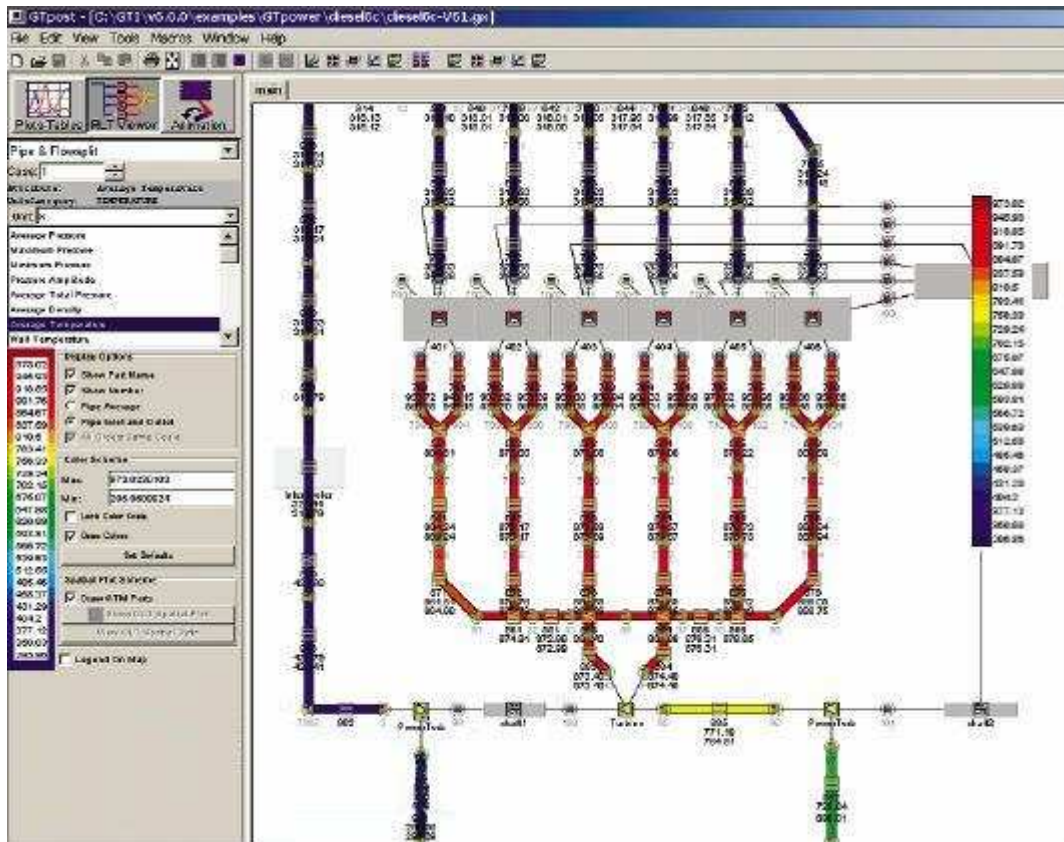


Fig 3.8 Programa GT-Power para simulación acústica

En la fabricación de las marmitas, la distinción fundamental entre los diversos tipos de éstas se halla en el método empleado para crear y cerrar la envolvente. Existen fundamentalmente tres:

- **Agrafadas:** se parte de una o dos chapas enrolladas según la forma deseada y se cierran mediante una costura mecánica prácticamente estanca. De este modo se prescinde de la soldadura y se disminuye significativamente el coste de fabricación. Sin embargo, no es posible emplear este método para marmitas de sección variable.
- **Clam-Shell:** se emplean dos semiconchas que forman el cuerpo de la marmita, y se unen entre si mediante soldadura. Permite trabajar con secciones variables y logra un nivel superior de estanqueidad, pero a un coste mayor.

- Spun: este sistema consigue estanqueidad total y también reduce el coste, al tratarse de un tubo mecanizado por ambos extremos. Generalmente se emplea para marmitas pequeñas o resonadores.

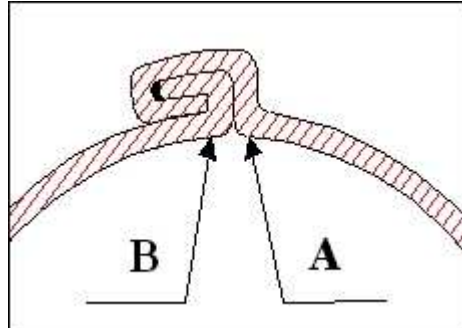


Fig 3.9 Esquema de cierre mediante agrafado

Elementos de sujeción:

Para sujetar el silencioso al chasis del vehículo se emplean varillas en las cuales se colocan elementos elásticos conocidos como silentblocks. Las varillas, que pueden estar compuestas por pequeños tubos o bien secciones macizas, se sueldan a diversos puntos del sistema.

Los silentblocks presentan al menos dos agujeros para insertar las varillas del silencioso y las del chasis, y deben poseer una elasticidad tal que transmitan el menor esfuerzo posible, sin permitir un movimiento excesivo del silencioso. Se suelen emplear silentblocks de EPDM (negros) en partes más frías, o silicona (rojos) para las zonas calientes, más habitualmente con motores de gasolina.

Tubo de cola:

El tubo de cola o de salida es el elemento final del sistema de escape, y su diseño influye también en los valores de contrapresión y contaminación acústica, que varían conforme a la longitud y sección del mismo.

Además, es la única parte del sistema que puede quedar a la vista dado que muchas veces sobresale por la parte trasera del vehículo. Este factor habitualmente influye también en el diseño, determinando si será recto o curvado hacia abajo -para evitar ensuciar el faldón- así como el material empleado o la inclusión de un elemento embellecedor.



Fig 3.10 Tubo de cola con embellecedor

En el presente proyecto, se analiza este componente desde el punto de vista de una nueva función hasta ahora no considerada: minimizar la transmisión de esfuerzos hacia el resto del silencioso ante un impacto trasero en el vehículo.

4. ESPECIFICACIONES

Este proyecto se ha realizado conforme al libro de especificaciones del cliente. Éste recoge un compendio de normas y requisitos exigibles a la empresa en todo el proceso de desarrollo de un producto. A continuación se muestran algunas de éstas, estando algunos de los títulos correspondientes ocultos a petición de Emcon Technologies:

1. Dibujos, planos y croquis:

xxxxxxxxx → Placa del Fabricante

2. Especificaciones técnicas – normas:

74/483 CEE → Salientes exteriores de los vehículos a motor.

DIN 40 050-9 → Vehículos de carretera; Grados de protección (IP); Protección contra objetos extraños; Agua y contacto; Equipos eléctricos.

VDA 231-106 → Clasificación de materiales en el vehículo, estructura y nomenclatura.

VDA 260 → Componentes de los vehículos a motor; Marcado de los materiales.

xxxxxxxxx → Sistema de punto de referencia; RPS; Dibujos.

xxxxxxxxx → Requisitos para datos de CAD/CAM; Presentación de los datos técnicos, calidad de los datos, proceso específico de asignación de capas, CATIA v4/v5.

xxxxxxxxx → Soldadura por arco eléctrico, uniones en chapa de acero; diseño, implementación, control de calidad.

xxxxxxxxx → Proveedores generales de partes del vehículo.

xxxxxxxxx → Superficies de piezas metálicas.

xxxxxxxxx → Componentes internos del vehículo; comportamiento de emisiones.

xxxxxxxxx → Componentes del vehículo; resistencia al desgaste.

xxxxxxxxx → Norma medioambiental para vehículos, partes del vehículo, materiales, suministros y consumibles; objetivos, requisitos.



xxxxxxxxx → Requisitos generales para la prestación de servicios en el contexto del desarrollo de componentes.

3. Otros documentos:

TPA-T-001 Revisión 3 → Método para el ensayo de medición de ruido de cola.

xxxxxxxxx → Intercambio de datos CAD.

xxxxxxxxx → Guía de proveedores de prototipos.

5. CONCEPTO Y DISEÑOS PRELIMINARES

En el siguiente apartado se realiza la descripción del concepto de tubo de cola flexible en el que se basa el desarrollo. Éste parte de un sistema de referencia que se detalla a continuación, junto con los diseños preliminares planteados. Finalmente se incluye la planificación para el estudio y la estimación inicial del coste.

5.1 CONCEPTO DE TUBO DE COLA FLEXIBLE

Los requisitos que habitualmente definen el diseño del tubo de salida de un sistema de escape responden a los objetivos de acústica y contrapresión marcados por el cliente, a la adaptación a la geometría del resto del sistema y del propio vehículo en que se instala, y cada vez más, al factor estético.

Debido a la gran competencia existente en el mercado de la automoción, los fabricantes buscan con insistencia alcanzar una imagen distinguida de su producto, procurando cuidar cada detalle. El sistema de escape también es tenido en cuenta en este sentido, y para añadir un elemento de deportividad ó elitismo al vehículo es práctica habitual dejar a la vista el tubo de salida, en muchas ocasiones presentando salidas dobles -pese a no ser estrictamente necesaria mayor sección de paso del gas- y también adornando el tubo con embellecedores cromados de diversas formas.

Así, el sistema de escape deja de ser una parte protegida por el resto del vehículo en caso de una colisión por la parte trasera, siendo susceptible de recibir graves daños incluso en alcances a baja velocidad. Éstos últimos suelen ser habituales en maniobras de aparcamiento y en general, en desplazamientos urbanos.

El propósito de este proyecto es estudiar qué sucede precisamente en ese tipo de colisiones, y proponer el diseño de un tubo de salida que sea capaz de verse sometido a un choque evitando dañar en la mayor medida de lo posible la marmita, que compone la parte fundamental y más costosa del silencioso. Esto es, modificar el diseño habitual de los tubos de cola para garantizar la mínima gravedad en los pequeños accidentes.

Es evidente, observando el modelo del tubo empleado en el diseño original, que el único modo que tiene éste de evitar dañar la marmita de la cual parte, es absorber la mayor cantidad de energía del impacto, convirtiéndola en energía interna -suma de energías elástica y plástica-.

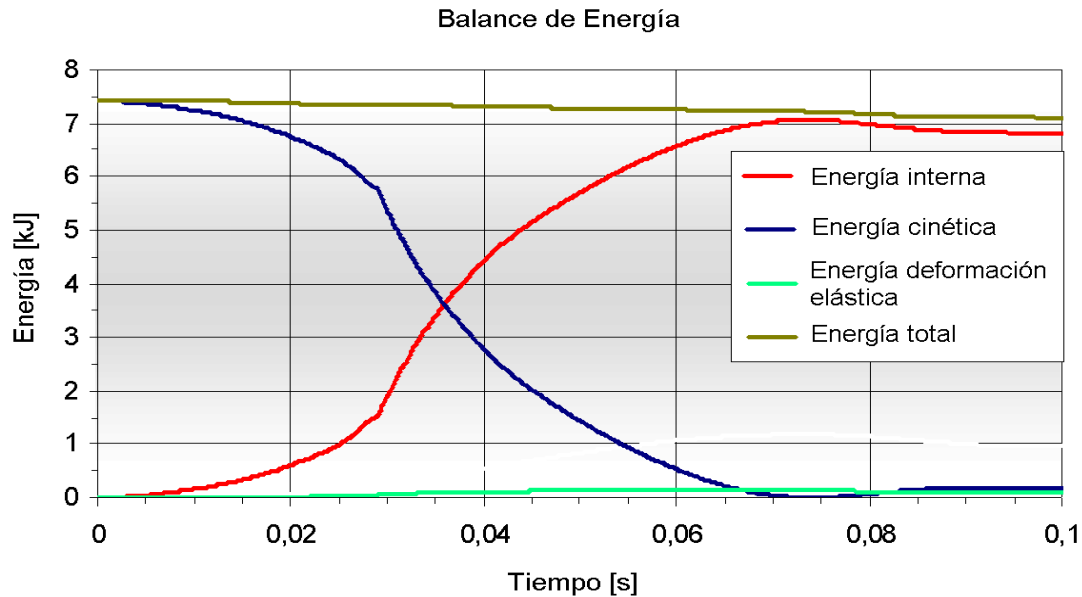


Fig 5.1 Transformación de la energía de impacto

Se puede apreciar, atendiendo al balance de energías de un impacto sobre una pieza similar a la estudiada, cómo efectivamente la mayor parte de la energía cinética se transforma en energía interna, pero sin embargo la variación de la energía de deformación elástica, y por tanto recuperable, es ínfima. Esto quiere decir que se originarán deformaciones plásticas en el sistema, pero además, no se puede asegurar que toda la deformación tendrá lugar en el tubo de cola.

Esto crea la necesidad de replantear el diseño introduciendo cambios sustanciales, que modifiquen el patrón de transformación de la energía del impacto. Existen a priori tres planteamientos para alcanzar la solución:

- Procurar maximizar la variación de energía elástica frente a la plástica.
- Localizar la variación de energía interna únicamente sobre el tubo de salida.
- Minimizar la variación de la energía interna del sistema.

En este caso, se ha centrado el esfuerzo en la tercera alternativa, intentando que las deformaciones que sufra el sistema, tanto elásticas como plásticas, sean mínimas. Así pues, se plantea un diseño del tubo de salida que le permita actuar como un mecanismo durante el impacto, eliminando la restricción al movimiento en uno de sus grados de libertad. Se trata de evitar deformaciones permitiendo desplazamientos.

Para ello el tubo de salida pasa a estar formado por dos piezas entre las cuales se permite el movimiento, dos tubos concéntricos que pueden deslizarse uno sobre el otro en la dirección del eje común:

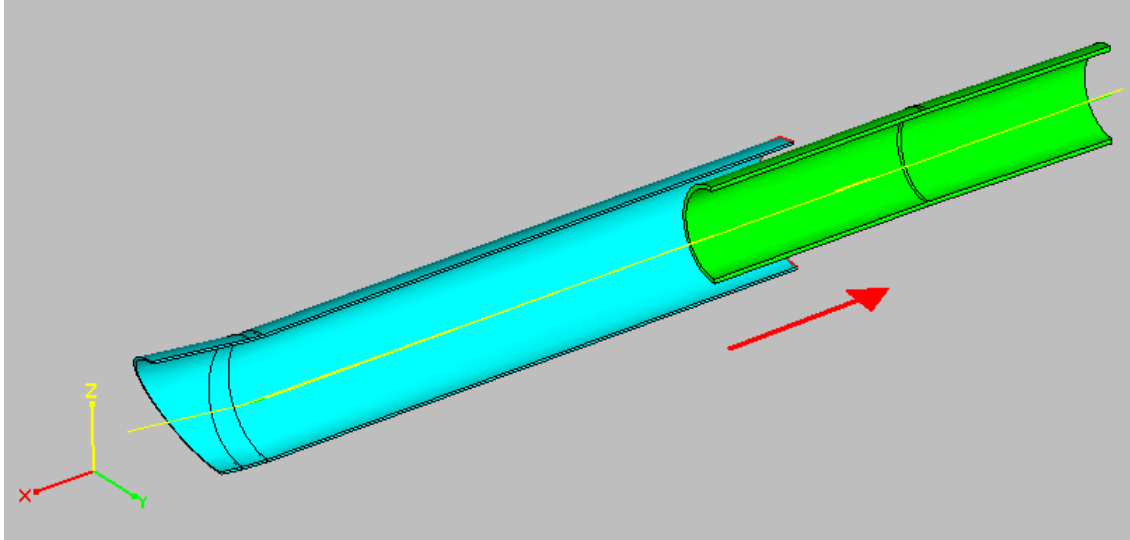


Fig 5.2 Concepto del mecanismo

5.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE REFERENCIA

En un principio, las conclusiones a extraer de este proyecto pueden ser empleadas para el desarrollo de cualquier sistema de escape, afectando únicamente al tubo de salida, que por otro lado, deberá reunir unas características determinadas para cada tipo de sistema. Así pues, los diseños aquí presentados siempre deberán sufrir algunas modificaciones para adaptarse a los requerimientos de cada caso, a saber: motorización, geometría del chasis, exigencias estéticas, etc. Para realizar estudios de impacto sobre sistemas de escape, el cliente impone el empleo de un sistema de referencia, correspondiente a una motorización de gasolina y cuatro cilindros en línea para la plataforma PQ24.

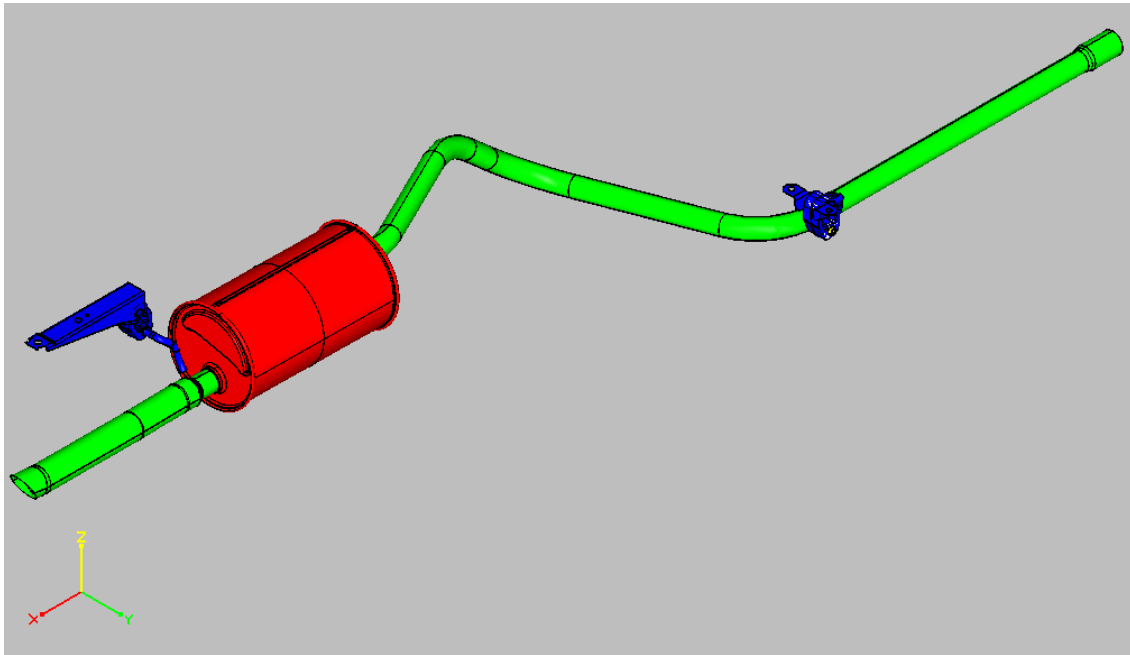


Fig 5.3 Modelo del silencioso de referencia

Se trata de un silencioso que emplea únicamente una marmita, de 8 litros de capacidad, ubicada en posición trasera. La referencia de la misma es 6Q0.253.611.BN, y consta a su vez de varios componentes:

- Tubo de entrada: se trata de un tubo de longitud 224mm, diámetro 42mm y espesor de 1mm, fabricado en acero 1.4512. Presenta una zona con perforado, en total 180 agujeros de diámetro 3.5mm. Además, en su parte anterior presenta un estrechamiento a diámetro 38.6mm para facilitar la soldadura al tubo intermedio del cual recibe los gases.
- Tubo de salida: este tubo tiene una longitud de 276.8mm y un diámetro de 38mm, fabricado igualmente de material 1.4512 y con un espesor de 1mm. Posee en su parte anterior una curva, de radio 60mm, y en la parte posterior un ensanchamiento a 38.6mm para la unión con el tubo de cola.
- Tapas interiores: son dos, dividiendo el espacio interior de la marmita en tres cámaras. El material empleado es 1.4512 y el espesor 1mm. Ambas tapas están perforadas con agujeros de diámetro 3.5mm, habiendo 64 agujeros en la posterior y 620 en la anterior -ésta es acústicamente transparente-. Los tubos de entrada y salida están unidos a estas tapas mediante sendos cordones de soldadura alrededor de la circunferencia de contacto.

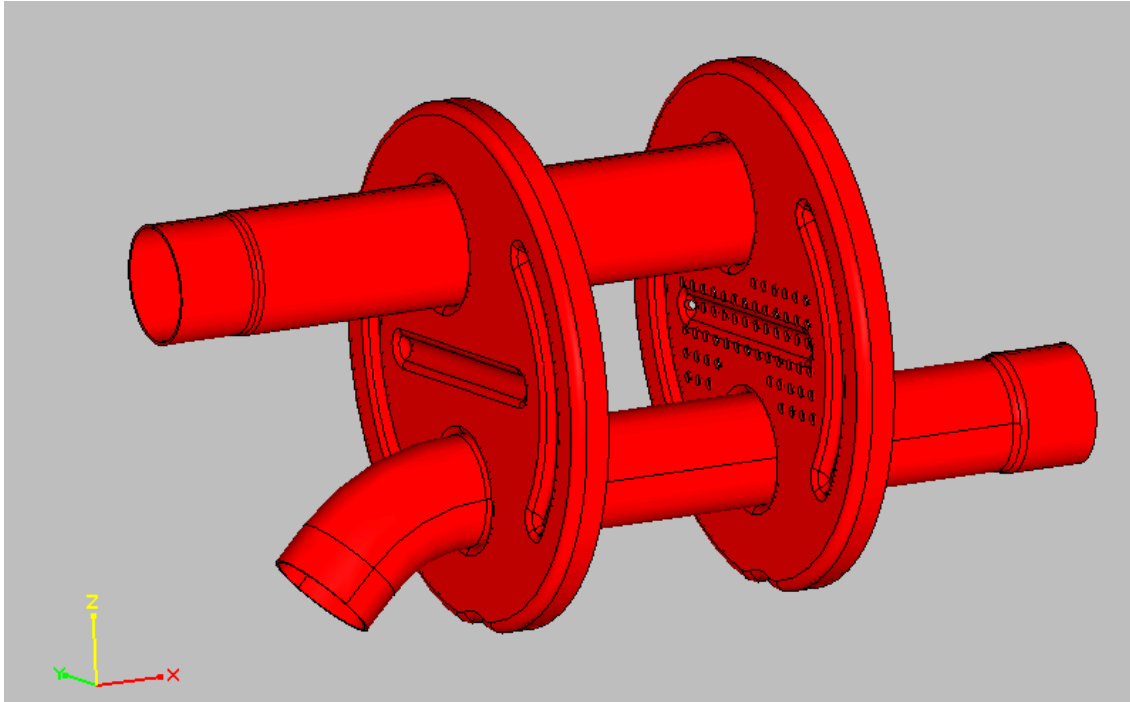


Fig 5.4 Posición de los tubos y tapas interiores

- Tapas exteriores: las tapas exteriores son similares a las interiores, realizadas también en acero 1.4512 pero de espesor algo superior, 1.2mm. La delantera y la trasera son iguales entre sí. A ellas se sueldan interiormente los tubos de entrada y salida anteriormente descritos, y por la parte exterior, de manera análoga, el tubo intermedio y el tubo de cola del silencioso.
- Envolvente: la envolvente consta de dos chapas rectangulares enrolladas para dar forma a un cilindro de 178mm de diámetro y 327mm de longitud. Ambas chapas tienen un espesor de 0.5mm, estando la interior fabricada en acero 1.4113 y la exterior en 1.4512. La unión, entre los extremos de las chapas rectangulares, que cierra el cilindro, se realiza mediante agrafado. Posteriormente se introduce el cuerpo de la marmita -tapas y tubos- y los bordes de las tapas exteriores se pliegan sobre los extremos libres de la envolvente.

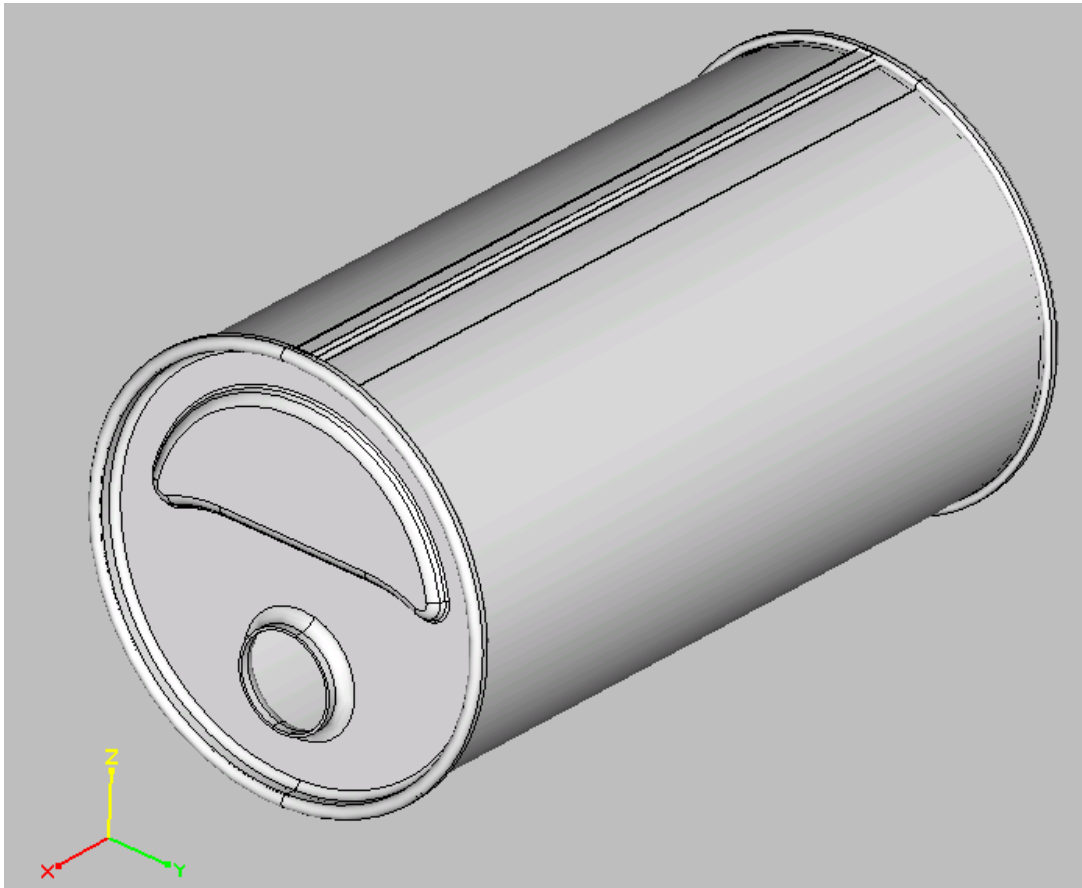


Fig 5.5 Vista exterior de la marmita

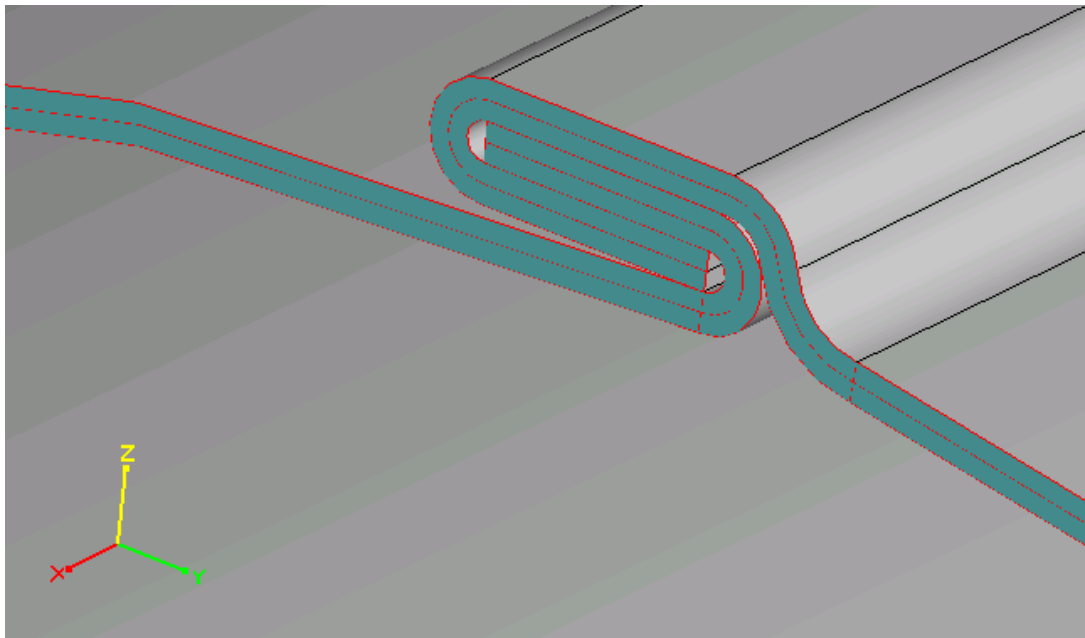


Fig 5.6 Detalle del agrafado

Por otro lado, el silencioso cuenta con el tubo intermedio, que transcurre desde la salida de la parte caliente o colector, hasta la marmita. Este tubo también está realizado en material 1.4512, de diámetro 38mm y espesor 1.2mm. Posee cuatro curvas, para

adaptarse a la geometría del chasis inferior del vehículo: la primera de radio 120mm y 78°, la segunda de radio 120mm y 75°, la tercera de radio 107mm y 48° y la última de radio 113mm y 28°. El tubo presenta también un ensanchamiento a 45mm de diámetro en su extremo anterior, para la unión con el colector.

El sistema se sujeta al vehículo mediante varillas de acero de 12mm de diámetro y espesor 1.5mm insertadas en silentblocks de EPDM en la parte trasera y silicona en la delantera.

Por último, el elemento que centra la atención de este estudio, el tubo de salida, está realizado en acero de calidad 1.4301, con espesor 1.5mm y diámetro 45mm. El diámetro a la salida de la marmita es de 38mm, posee una curva de radio 80mm y 6°, e inglete a 60° en la parte posterior. La longitud total es de 427mm.

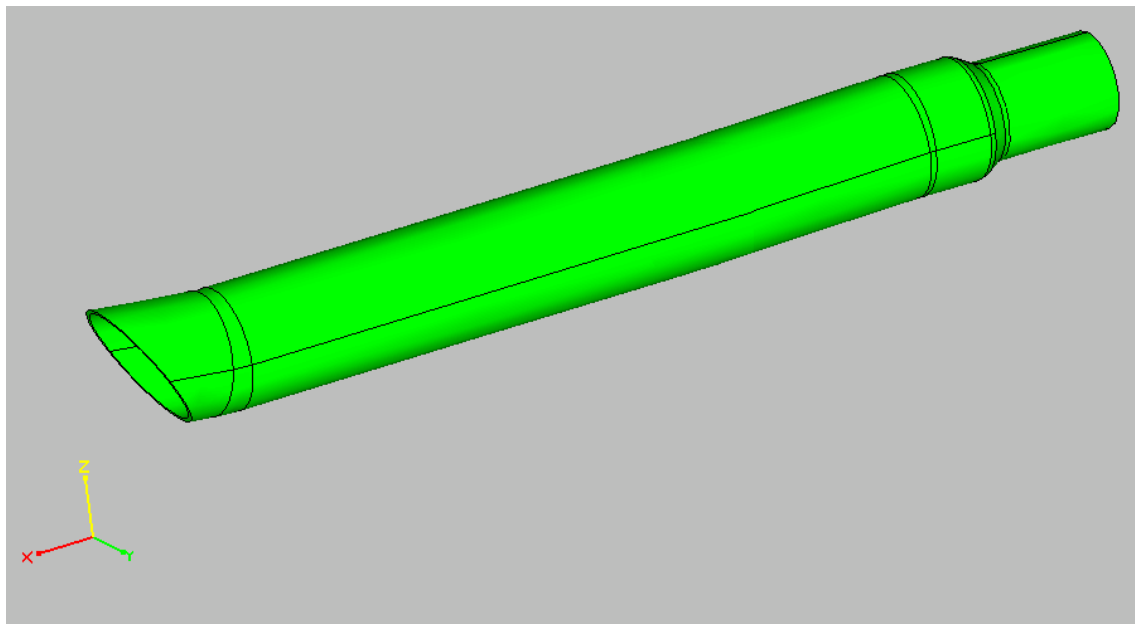


Fig 5.7 Tubo de cola del silencioso original

5.3 PROPUESTAS DE DISEÑO

5.3.1 Propuesta del cliente

El cliente realiza una proposición para el diseño basada en el concepto del mecanismo descrito anteriormente, de manera que sea estudiada y se propongan por parte de la empresa posibles mejoras ó nuevas alternativas. Ésta recibe el nombre de Alternativa_0.

En esta proposición, el tubo de salida consta de cuatro elementos: dos tubos concéntricos, y dos anillos colocados entre ambos. El tubo exterior, que forma el tramo

final, puede deslizar longitudinalmente sobre el interior, que está soldado a la salida de la marmita. Los anillos situados entre ambos mantienen la posición relativa entre tubos, y en caso que sea ejercida alguna fuerza sobre el exterior, limitan el desplazamiento de éste por acción del rozamiento.

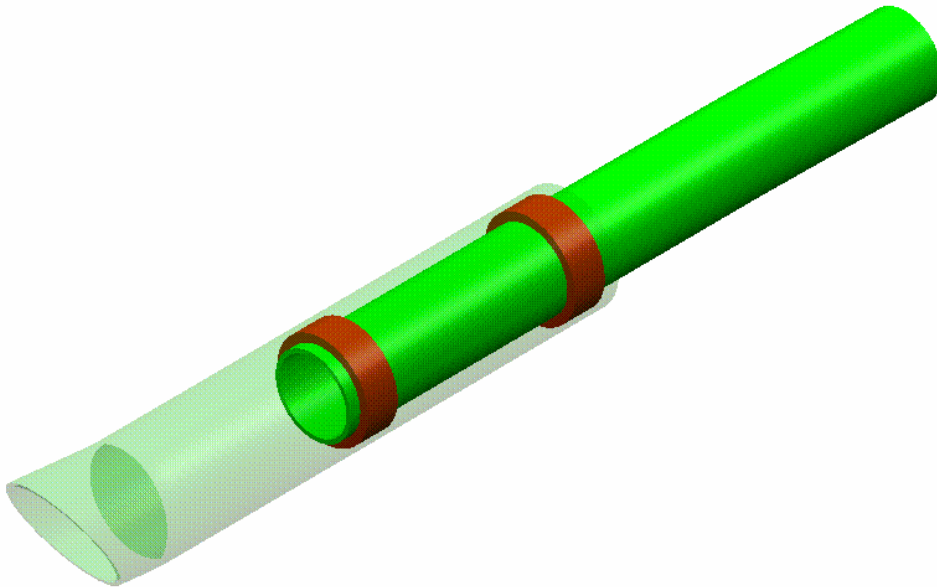


Fig 5.8 Diseño conceptual de Alternativa_0

Las características de estos elementos son las siguientes:

- Tubo interior: el tubo interior o de entrada tiene una longitud de 300mm y un diámetro de 45mm, achicado a 38mm en la salida de la marmita. El material empleado es acero 1.4512 de espesor 2mm.
- Tubo exterior: el tubo de salida, de longitud 257mm, es de diámetro 50mm y espesor 2mm. Su calidad es 1.4301, y al igual que el original, posee una curva de radio 80mm y 6° e inglete a 60°.
- Anillos: los anillos, de referencia 1312364, son elementos compuestos por una malla metálica de material 1.4404, cuyo diámetro es de 49mm y su espesor de 2mm.

La longitud en la cual se superponen ambos tubos es de 130mm, consiguiendo así una longitud total equivalente a la del elemento original, 427mm. Además, en ese tramo se realiza el calibrado de ambos tubos, a 45.5mm el interior y 53.2mm el exterior, para adaptarlos a las dimensiones de los anillos.

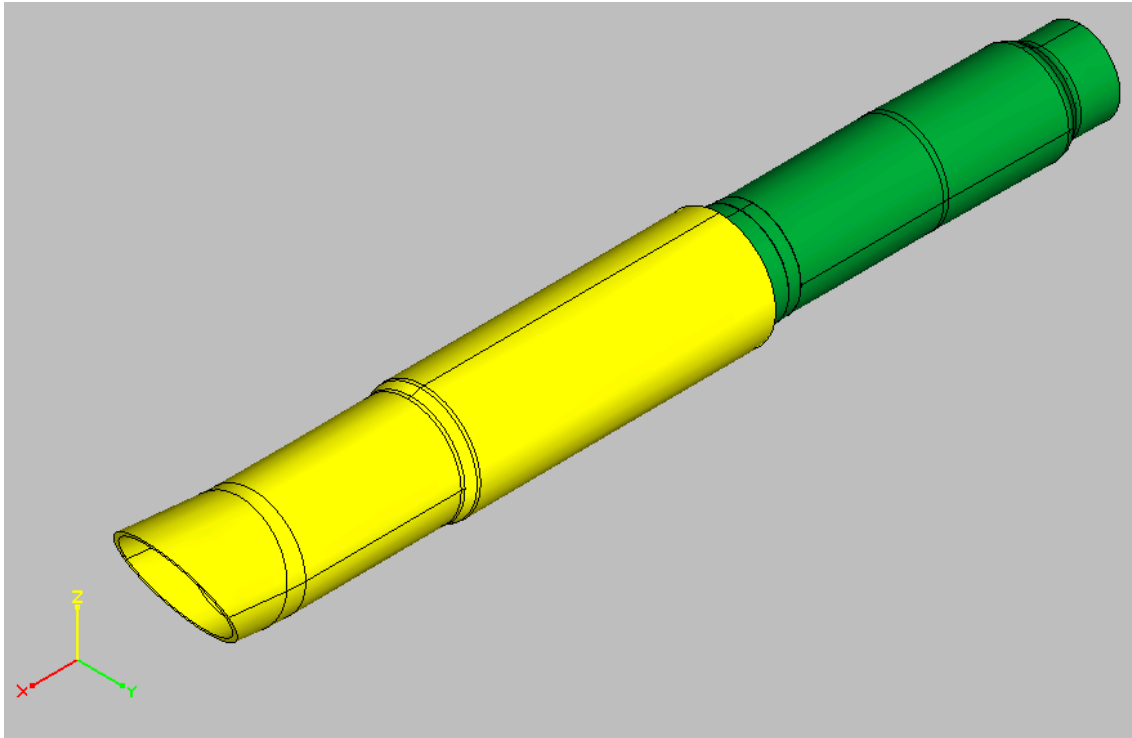


Fig 5.9 Modelo de Alternativa_0

Éstos se sueldan al tubo interior mediante cuatro puntos de soldadura por resistencia, y el segundo tubo se inserta sobre el primero, debiendo ser esta presión de inserción suficiente para mantener la geometría del conjunto en condiciones normales.

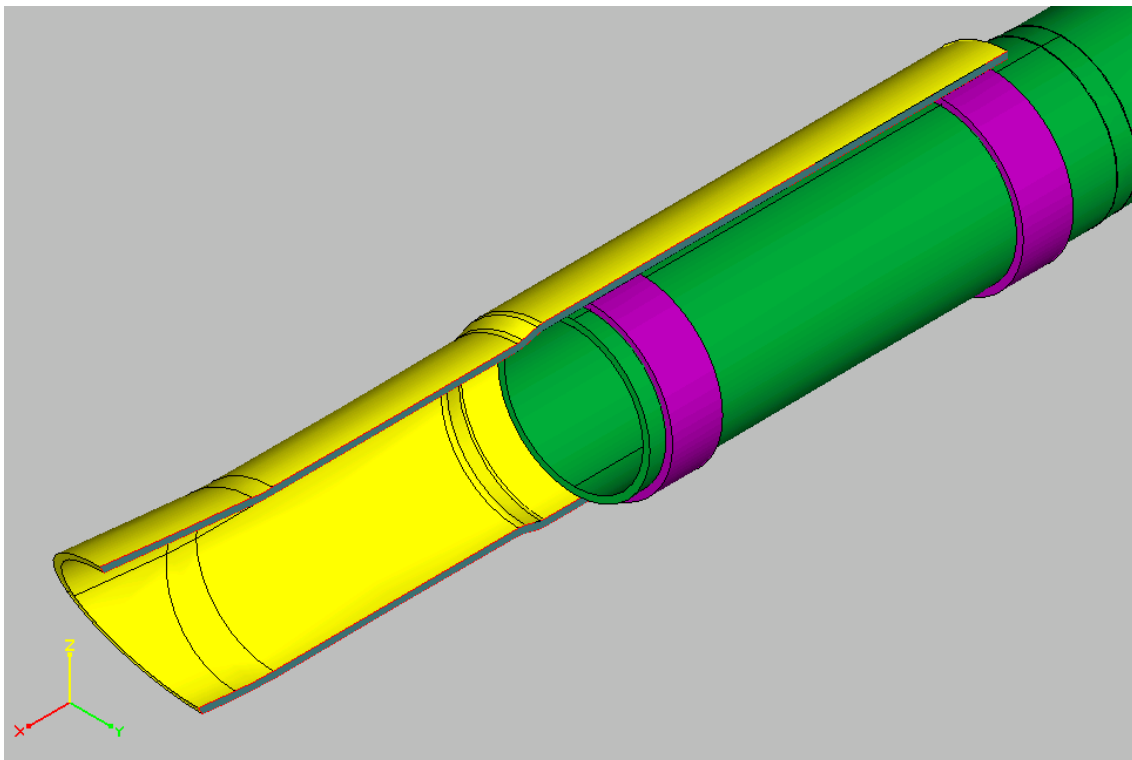


Fig 5.10 Detalle de posición de los anillos



El punto fuerte de esta solución radica principalmente en su sencillez. A priori, se podría evitar en gran medida la necesidad de recambios en caso de verse afectado por una colisión, siendo únicamente necesaria una sencilla operación para restituir la posición original del tubo exterior. Sin embargo, tras un análisis algo más profundo se detectan los siguientes puntos negativos:

- Alta probabilidad de desprendimiento de la parte posterior en condiciones de marcha debido a las vibraciones del sistema.
- Susceptibilidad a extracciones accidentales o robos, sobre todo en caso de añadir elementos embellecedores.
- Dificultad para definir una presión de inserción correcta: es necesario alcanzar un punto de equilibrio que asegure un deslizamiento suficiente para evitar transmisión de esfuerzos, y una sujeción adecuada para evitar un fuerte impacto del propio tubo sobre la marmita.

Ante estos inconvenientes, EMCON plantea dos nuevas alternativas de diseño que se describen a continuación.

5.3.2 Primera alternativa

Desde la empresa, se continúa trabajando con el mismo concepto del deslizamiento relativo entre tubos para evitar en la medida de lo posible las deformaciones sobre el sistema.

Respecto a la propuesta anterior, se procura introducir modificaciones que eviten el desprendimiento del tubo posterior, bien debido a las vibraciones del sistema en servicio ó a la sustracción del mismo. También se limita el desplazamiento de éste hacia la marmita en el instante del impacto. Para ello, se asegura el contacto directo entre ambos tubos: se practican cuatro cortes longitudinales al inicio del tubo exterior, creando dos pletinas que se doblan hacia el interior de modo que reposen sobre la superficie del otro tubo, y se añade soldadura en el extremo.

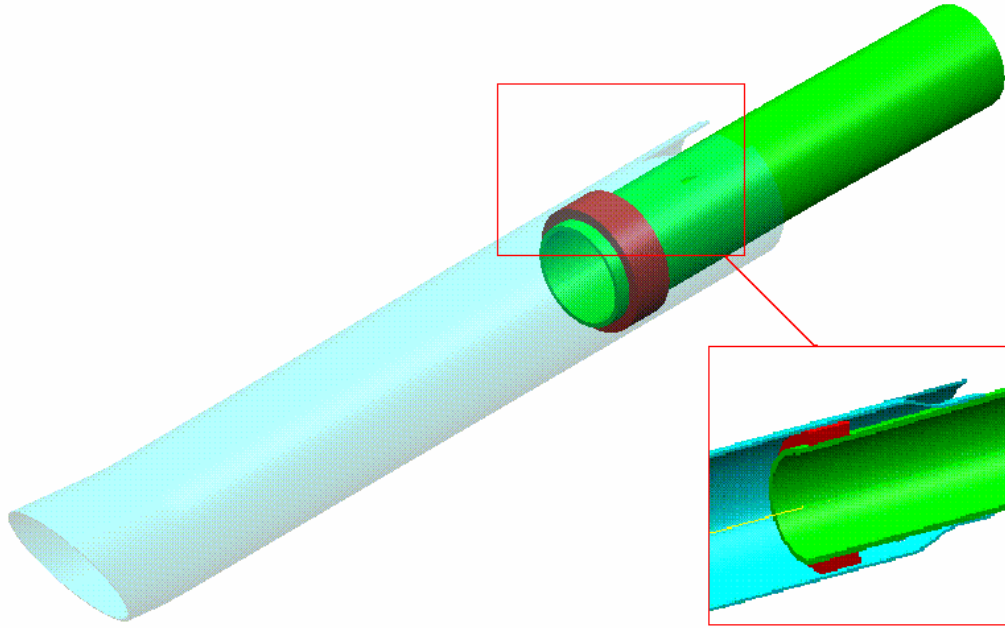


Fig 5.11 Diseño conceptual de Alternativa_1

Así, se compone de las siguientes partes:

- Tubo interior: tiene una longitud de 184mm, está realizado en acero 1.4512 de espesor 1.8mm y su diámetro es 45mm, con la salida de la marmita en 38mm.
- Tubo exterior. Su longitud es de 316mm y el diámetro de 50mm, mientras que el material empleado es 1.4301 de 1mm de espesor. La curva y el inglete son análogos a los del diseño anterior.
- Anillo: se emplea únicamente un anillo de las mismas características que los descritos anteriormente -Ref. 1312364- situado en el extremo posterior del primer tubo.

En este caso la longitud de superposición es de 73mm para conseguir la misma longitud total, e igualmente ambos tubos están calibrados en ese tramo, a 45.5mm el interior y 51.2mm el exterior.

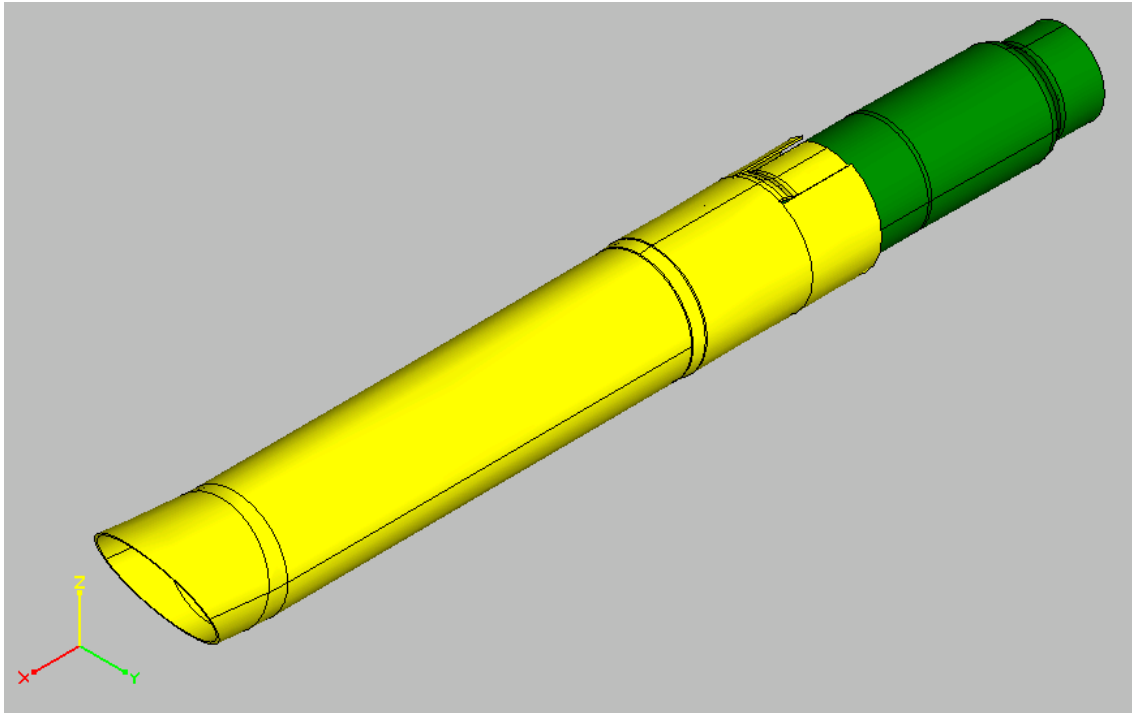


Fig 5.12 Modelo de Alternativa_1

Los cortes en éste último son de una anchura de 2mm y longitud de 32.5mm, separados 20mm entre sí, de manera que forman las pletinas antes mencionadas en la parte superior e inferior.

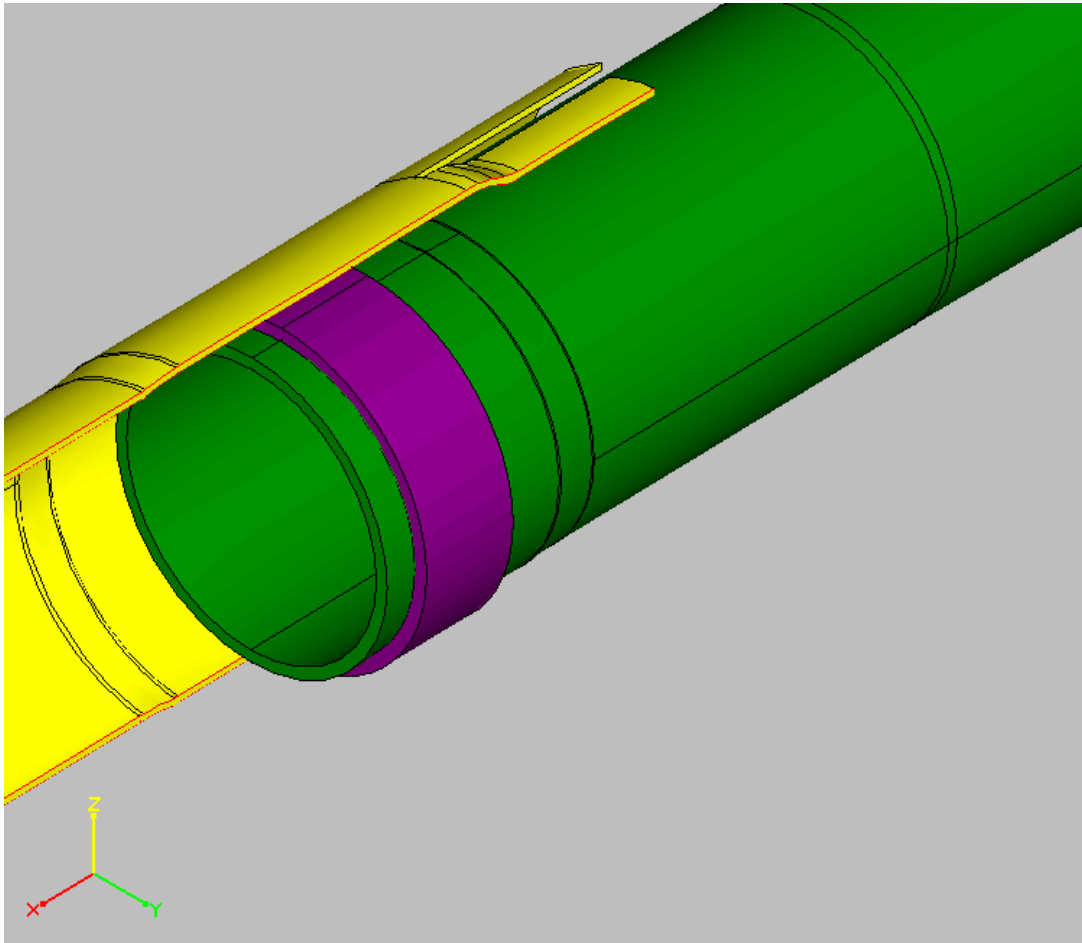


Fig 5.13 Detalle del corte y doblado de las pletinas

Este diseño es algo más robusto, evitando la sustracción o desprendimiento del tubo posterior. No obstante, introduce un elemento que provocará un cambio significativo en la respuesta ante el impacto, puesto que ahora el deslizamiento no se verá limitado solamente por el rozamiento con el anillo de malla, sino también por la resistencia a la deformación ó rotura de las pletinas.

Será importante conocer el comportamiento del material en esa sección e intentar, en caso de necesidad, modificar el diseño para asegurar que el inicio de la deformación y la mayor parte de la misma suceden precisamente en ese punto.

La soldadura en este caso debe ser por puntos para los anillos y por arco eléctrico en las pletinas, para aportar mayor rigidez a la unión, intentando evitar que se produzca la rotura de la misma para mantener el control sobre el comportamiento del modelo.

5.3.3 Segunda alternativa

Se plantea una segunda alternativa que sigue la línea de la primera, de modo que consta igualmente de dos tubos con un solo anillo situado entre ambos, y cuatro cortes practicados al tubo exterior formando dos pletinas en la parte inferior y superior.

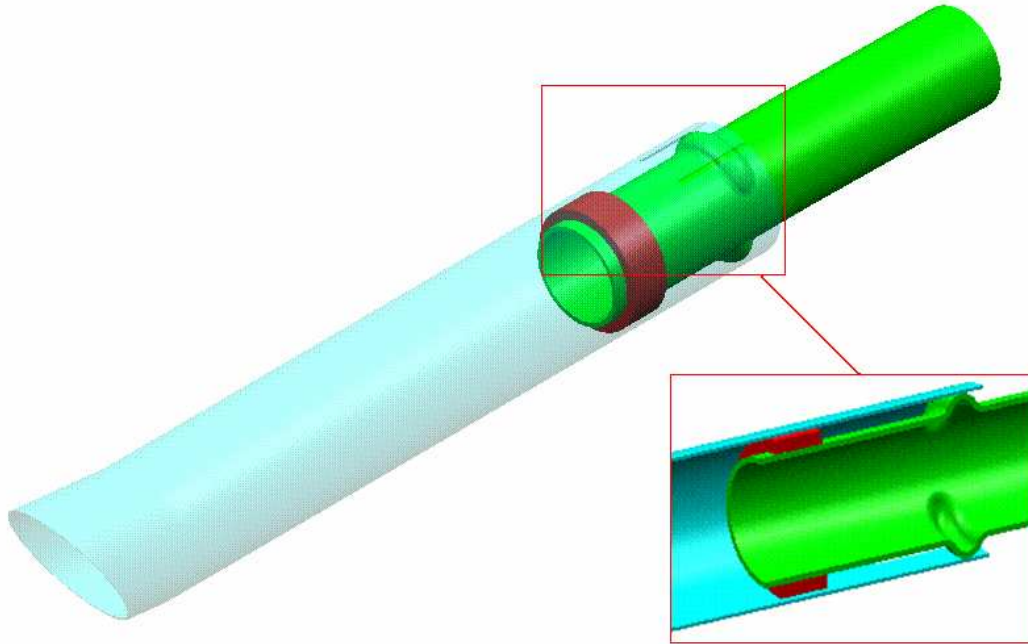


Fig 5.14 *Diseño conceptual de Alternativa_2*

La diferencia en este caso radica en la unión entre ambos tubos: en lugar de doblar las secciones entre cortes del tubo exterior hacia dentro, hasta hacer contacto, se mantienen en su posición, mientras que el tubo interior está conformado con dos hendiduras hacia fuera. Éstas hendiduras hacen contacto con los extremos de las pletinas para llevar a cabo la unión mediante soldadura en dichos puntos.

Las dimensiones de tubos y anillo, calidades y espesores se mantienen respecto a las de la primera alternativa.

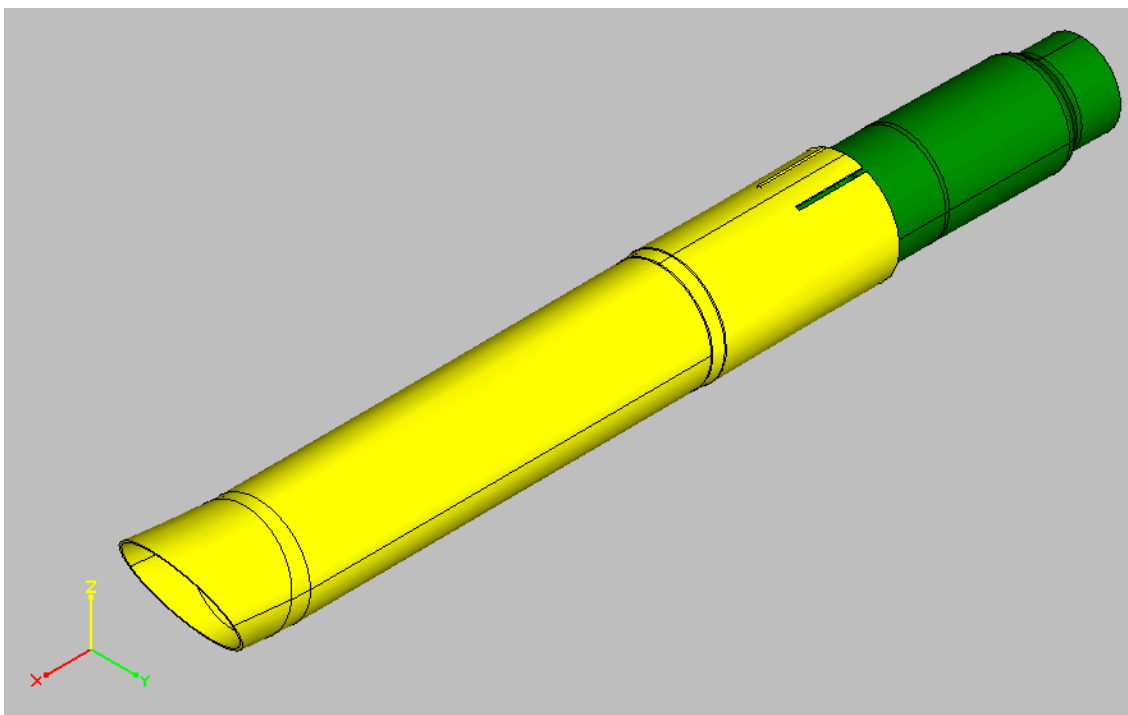


Fig 5.15 Modelo de Alternativa_2

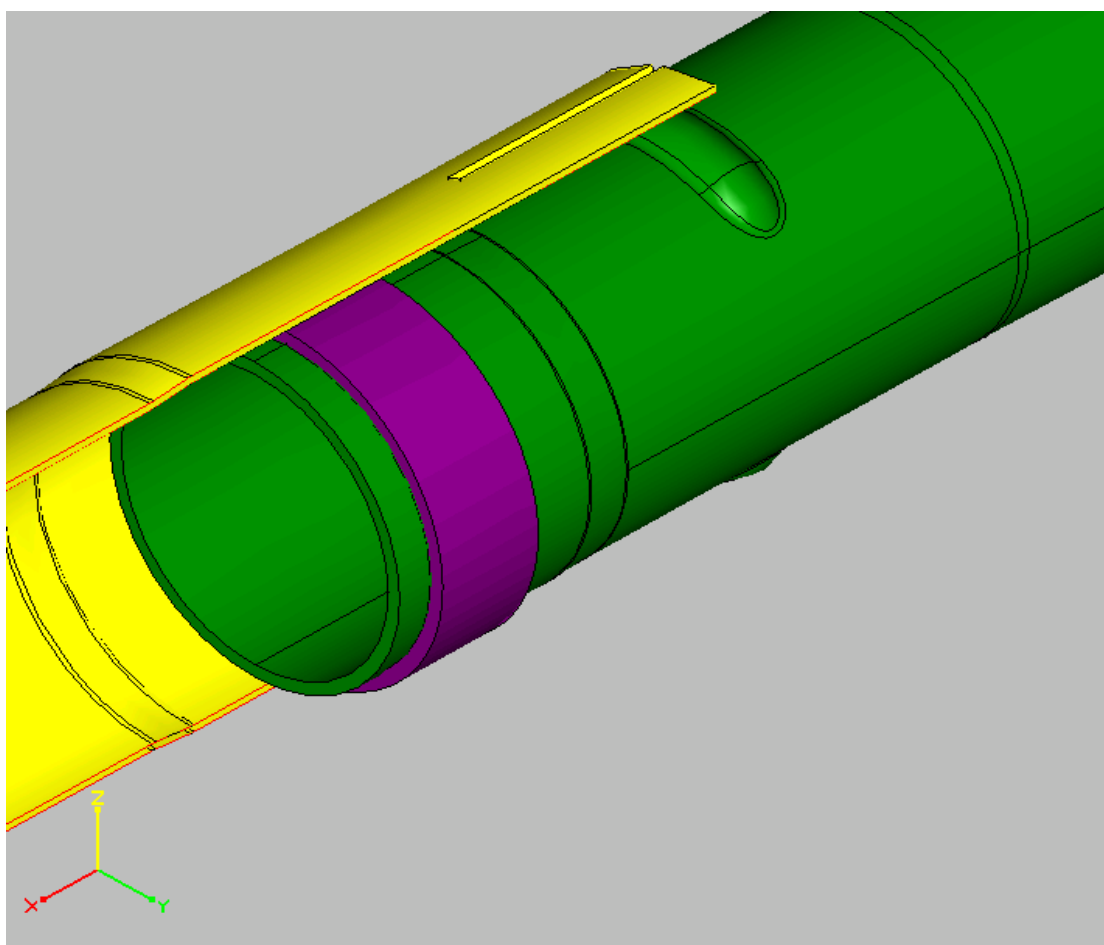


Fig 5.16 Detalle del contacto entre pletinas y hendiduras



En el desarrollo de este diseño habrá que actuar de manera similar al del anterior, debiendo prestar especial atención a la deformación de la unión entre tubos. Además, la presencia de las protuberancias en el tubo interior podría modificar su comportamiento en este sentido.

Con ambas alternativas, se elimina el riesgo de desprendimiento de la parte exterior a costa de un proceso de fabricación que será algo más complejo. El segundo inconveniente que se presenta es la dificultad de recuperar el tramo posterior tras una colisión, puesto que quedará irremediabilmente dañado en la zona de las pletinas de contacto.

Se realizará el análisis de estos tres modelos -además del tubo de cola original- para extraer conclusiones sobre la idoneidad de los mismos, pudiendo proponerse, a la vista de los resultados, otros diseños conceptuales que solucionen los problemas detectados. En tal caso, será necesario centrarse en concebir un diseño con componentes más fácilmente realizables y recuperables.

Los detalles de todos los elementos anteriormente descritos pueden consultarse en los planos disponibles.

4.4 MATERIALES EMPLEADOS

Como se ha indicado en la descripción de los distintos componentes, se emplean fundamentalmente tres materiales diferentes, que son los aceros inoxidables EN 1.4512, EN 1.4301 y EN 1.4113. La norma europea que estandariza estos aceros inoxidables es la EN-10088.

Existen tres familias principales de aceros inoxidables:

- **Martensíticos:** son los que mayor concentración de carbono poseen, superior al 0.10 %, y con un contenido en cromo entre el 12 % y el 14 %. El tipo que caracteriza a este grupo es el EN 1.4028 – AISI 420.

Como su propio nombre indica, su constituyente es la martensita, obtenida mediante enfriamiento desde el estado austenítico a altas temperaturas. Su estructura es acicular, de gran dureza y fragilidad:



Fig 5.17 Estructura martensítica

Para alcanzar este estado se someten a tratamientos de templado y revenido que evitarán la precipitación de carburo de cromo, garantizando su resistencia a la corrosión y proporcionando un nivel de dureza y fragilidad adecuado. Los aceros martensíticos son magnéticos.

- **Ferríticos:** en esta familia, aumenta la cantidad de cromo y disminuye notablemente la de carbono. Los valores típicos para el primero son de 16 % a 18 % y para el segundo, menores que el 0.1 %. El tipo característico es el EN 1.4016 – AISI 430.

La ferrita es una estructura más dúctil, pudiendo someter a estos aceros a conformaciones de tipo medio. La soldabilidad también es mejor aunque suele presentar fragilidad en la unión.

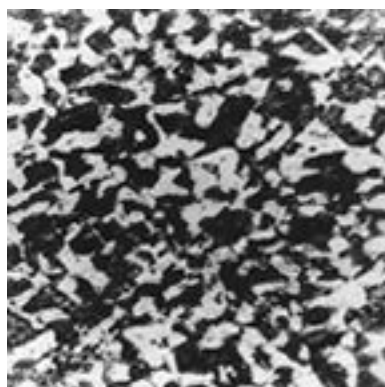


Fig 5.18 Estructura ferrítica

Al igual que los anteriores, los aceros ferríticos son magnéticos, mientras que su resistencia a la corrosión y apariencia son mejores.

- **Austeníticos:** esta clase de aceros inoxidable también cuenta con una cantidad de carbono inferior al 0.1 % y alrededor de un 18 % de cromo, incluyendo además el níquel en la aleación. El tipo que caracteriza al grupo es el EN 1.4301 – AISI 304, que contiene un 8 % de níquel.

La estructura martensítica los hace muy dúctiles, otorgándoles propiedades de conformación excelentes y muy buena soldabilidad.

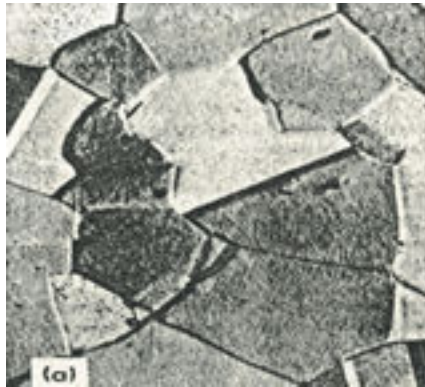


Fig 5.19 Estructura ferrítica

La apariencia de los aceros de esta familia es la mejor, además de poseer una gran resistencia a la corrosión, haciendo que sean ampliamente empleados y valorados para muchas aplicaciones. No son magnéticos.

En el sistema en estudio, el material más empleado es el EN 1.4512, que pertenece al grupo de los ferríticos. Contiene 0.08% de carbono como máximo y entre 10.5 % y 11.75 % de cromo, además de titanio -entre 6xC y 0.75 %- para mejorar su soldabilidad. También puede contener un máximo de un 1 % de silicio y manganeso. Posee una buena resistencia a las altas temperaturas y también buena maleabilidad, además de bajo coste. Este material fue concebido desde un principio para su utilización en sistemas de escape para automóviles aunque actualmente se emplea también para otras aplicaciones.

En el tubo de salida del sistema original, así como en los tubos exteriores de los tres diseños presentados, el material empleado es el EN 1.4301, del grupo de los austeníticos. Contiene un 0.08 % de carbono como máximo, 18 % de cromo y 8% de níquel, dotándole de unas cualidades mecánicas y resistencia a la corrosión excelentes, además de ser fácilmente manipulable. Así pues, se trata de un material de uso generalizado, y se escoge en este caso para la parte a la vista del sistema ya que presenta una apariencia mejor, pese a aumentar ligeramente el coste.



Por su parte, el acero EN 1.4113 es el empleado para la envolvente interior de la marmita. Éste pertenece también al grupo de los ferríticos, siendo una derivación del EN 1.4016 con adición de un 1 % de molibdeno para evitar la corrosión por picaduras que tiende a suceder en el interior de este componente.

Los anillos de malla empleados tanto en el diseño propuesto por el cliente como en las dos alternativas son de acero inoxidable EN 1.4404, de tipo austenítico, con 16 % de cromo y 10 % de níquel, y además un 2 % de molibdeno que aumenta todavía más la resistencia a la corrosión.

A continuación se pueden ver algunos datos técnicos referentes a los materiales mencionados. Los valores mostrados son válidos a 20 °C, y algunas características pueden variar además dependiendo del fabricante:

Material (DIN-EN)	Resistencia a la tracción Rm (N/mm2)	Límite Elástico Rp0,2 (N/mm2)	Módulo de Young E (N/mm2)	Alargamiento mínimo 50mm (%)	Dureza Brinell máxima (HB)
14512	360-520	200-330	200000	25	170
14301	500-700	200-340	193000	45	190
14113	540-600	250-400	200000	22	180
14404	520-690	230-260	193000	45	200

4.5 PLANIFICACIÓN DE ACTIVIDADES Y ESTIMACIÓN DE COSTES

Este estudio consta fundamentalmente de tres partes, mediante las cuales se pretende seleccionar la mejor alternativa de diseño y validarla de manera preliminar. Así, en un primer momento se ha de realizar la simulación del impacto sobre el tubo de cola y seleccionar el diseño más adecuado a priori. Más adelante se verifica el resultado anterior mediante la realización de un ensayo de impacto. Finalmente, se realiza también un ensayo de acústica, puesto que éste es siempre un requisito fundamental y determinante en las primeras etapas del desarrollo de un sistema de escape. Se ha de comprobar que el diseño escogido no modifica gravemente las propiedades acústicas del sistema de referencia.



A continuación se presenta la planificación prevista para las tres fases mencionadas:

Simulación de impacto:

- Preparación de modelos 3D con CATIA.....01/07 – 03/07
- Determinación del modelo de MEF más adecuado
 - Preproceso del diseño de prueba.....08/07 – 10/07
 - Cálculo y análisis de resultados.....13/07
 - Correcciones y optimización del método.....14/07 – 17/07
- Preproceso de todos los componentes.....20/07 – 24/07
- Cálculo de todos los componentes.....27/07 – 30/07
- Postproceso de resultados.....30/07 – 31/07
- Optimización y selección de alternativas
 - Modificación de geometrías.....03/08 – 04/08
 - Preproceso y cálculo.....05/08 – 06/08
 - Postproceso de resultados.....07/08

Total simulación de impacto.....01/07/09 – 07/08/09: 38 días.

Ensayo de impacto:

- Preparación de planos.....01/09 – 02/09
- Prototipado de muestras.....03/09 – 07/09
- Preparación de la bancada de ensayo.....15/09 – 18/09
- Realización del ensayo.....21/09
- Análisis de resultados.....21/09 – 22/09

Total ensayo de impacto.....01/09/09 – 22/09/09: 22 días.



Ensayo de Acústica:

- Preparación de muestras.....28/09
- Preparación del equipo de ensayo.....29/09
- Realización del ensayo y análisis de resultados.....29/09

Total ensayo de acústica.....28/09/09 – 29/09/09: 2 días.

TOTAL.....01/07/09 – 29/09/09: 91 días.

Así mismo, se estima el coste que van a suponer estos trabajos. Dado que el tiempo invertido en cada tarea puede variar, el coste final puede diferir en cierta medida de la estimación realizada.

Simulación de impacto:

Tarea	Horas máquina	Horas persona	Total
	Estación CAE	Ingeniero CAE	
	-	50 €/h	
Preproceso prueba	20h	20h	1000 €
Cálculo prueba	6h	0h	-
Postproceso prueba	2h	2h	100€
Preproceso diseño	30h	30h	1500 €
Cálculo diseño	24h	0h	-
Postproceso diseño	8h	8h	400 €
TOTAL	-	3000€	3000 €

Ensayo de impacto:

Tarea	Horas máquina	Horas persona		Otros		Total
	Bancada impacto -	Técnico 50 €/h	Mecánico 40 €/h	Muestras	Transporte	
Preparación	20h	10h	20h	150€	200€	1650€
Ensayo	6h	6h	6h	-	-	540€
TOTAL	-	800€	1040€	150€	200€	2190€

Ensayo de acústica:

Tarea	Horas máquina	Horas persona		Otros	Total
	Banco Motor 55€/h	Técnico 50€/h	Mecánico 40€/h	Muestras	
Preparación	0h	0h	5h	50€	250€
Ensayo	4h	4h	2h	-	500€
TOTAL	220€	200€	280€	50€	750€

Así pues, la estimación inicial del coste es de un total de 5940 €.

6. SIMULACIÓN DE LA RESPUESTA ANTE UN IMPACTO

La capacidad de simular el comportamiento de un componente en unas condiciones de servicio determinadas ofrece una sustancial ayuda en el proceso de diseño.

En el siguiente apartado se detalla el modo de llevar a cabo una simulación de impacto, mediante el Método de Elementos Finitos, para los diseños del tubo de cola anteriormente descritos. Se divide en los siguientes puntos:

- Herramientas empleadas
- Metodología del proceso de simulación
- Resultados de la simulación
- Conclusiones

Una vez determinado el método más apropiado para mallar todos los elementos, con especial atención a los anillos de malla, se calcula la respuesta ante el impacto del tubo original, así como la propuesta del cliente y las dos alternativas de Emcon, escogiendo el diseño más adecuado para continuar el desarrollo.

6.1 HERRAMIENTAS EMPLEADAS

Las herramientas de ingeniería asistida por ordenador son diversas y ofrecen un amplio abanico de capacidades. La simulación numérica permite generar modelos virtuales de sólidos para estudiar su comportamiento desde diversos puntos de vista, lo cual posibilita conocer de manera profunda cada elemento antes de que sea producido físicamente.

Dentro de los métodos más habituales de análisis computacional, la más utilizada en aplicaciones industriales es probablemente el Método de los Elementos Finitos, que es el empleado en este caso. El trabajo realizado con este método se divide en tres tareas básicas: preproceso, cálculo y postproceso.

Preproceso

Esta primera parte engloba la mayoría de las tareas del proceso de simulación, y es probablemente la más determinante. Se debe definir la geometría de manera que se asemeje en la mayor medida de lo posible a la realidad, y caracterizar correctamente los



materiales empleados. Más adelante se realiza el mallado y definición de las cargas y condiciones de contorno del cálculo.

Para ello, se parte de los modelos del sistema de referencia así como de los diseños preliminares realizados con el programa CATIA V4. Este programa está realizado por Dassault Systemes en Francia. Se emplea habitualmente en la industria aeronáutica y automovilística y ofrece apoyo tanto en el diseño, la producción y el análisis de componentes.

Estos modelos se importan en un segundo programa, que ofrece capacidad para realizar el preproceso y el postproceso, Hypermesh. Es una aplicación de Altair ampliamente empleada para la realización de este tipo de tareas, debido a su sencillez de manejo y comodidad de la interfaz, así como su gran capacidad y rendimiento.

Cálculo

Una vez establecidas las condiciones del problema a resolver, el módulo de cálculo se encarga de despejar las incógnitas requeridas, otorgando los resultados necesarios para el posterior análisis. Para ello es necesario elegir bien el tipo de cálculo que va a realizarse y establecer ciertos parámetros que afectarán al mismo. En función de la precisión que se requiera variará además el tiempo invertido en el mismo, de manera que debe establecerse un compromiso entre precisión de los resultados y coste computacional.

El programa empleado para desempeñar esta tarea es Abaqus, en su versión Explicit para cálculos de dinámica explícita. Aunque se emplea fundamentalmente para la resolución de problemas de dinámica rápida, como los de choques o explosiones, ofrece una gran robustez y puede ser empleado también para otros cálculos cuasi-estáticos con gran cantidad de deformaciones. Está realizado por la empresa Simulia.

Postproceso

Esta última tarea es la consistente en el análisis de los resultados obtenidos mediante el cálculo y su representación.

Se utiliza el programa Abaqus Viewer, también perteneciente a Simulia. Éste permite, mediante una interfaz cómoda e intuitiva, obtener mucha información sobre los datos obtenidos y realizar gran cantidad de representaciones gráficas que ayudan a su comprensión.

6.2 METODOLOGÍA DEL PROCESO DE SIMULACIÓN

El objetivo de esta tarea es analizar cómo un muro con una masa de valor conocido incide a una determinada velocidad sobre el tubo de cola del sistema de escape, y determinar cuál es el diseño más adecuado para garantizar una transmisión de esfuerzos y una deformación mínimas en la marmita trasera del silencioso.

En este caso no se dispone de un procedimiento estandarizado de ensayo, por tratarse de un área de conocimiento que hasta el momento no ha sido excesivamente trabajada por parte de la empresa. El cliente tampoco ha facilitado valores de masa y velocidad que determinen las condiciones del ensayo, de manera que se fijan unos valores experimentales a partir de los cuales se pueden extraer valiosas conclusiones tanto a cerca del diseño como del propio procedimiento. En un principio se considera una masa de 600kg y una velocidad en el momento del impacto de 4m/s. Éstos se consideran valores adecuados para simular y ensayar una colisión a baja velocidad por parte de un turismo normal, como podría suceder, por ejemplo, en una maniobra de aparcamiento o un accidente en la vía urbana.

El muro incide únicamente sobre el tubo de cola, y además se limita su desplazamiento para imitar la acción del paragolpes del vehículo. Esto se logra mediante la colocación de cuatro topes fijos y completamente rígidos que detendrán el movimiento del muro una vez alcanzada una cierta distancia. Además, se estudia únicamente la marmita trasera y el tubo de cola, puesto que el resto del sistema de escape no se verá afectado en gran medida, y el análisis de estos elementos es suficiente para extraer conclusiones sobre la respuesta de los diferentes diseños. Así, la marmita se hallará empotrada en el extremo de entrada, y recibirá el impacto del muro por el extremo contrario.

6.2.1 Preparación de la geometría y materiales

Se dispone, por una parte, del modelo 3D realizado en CATIA v4 del sistema de referencia, descrito en el capítulo anterior. Por otro lado, se dispone también de los modelos correspondientes a los diferentes diseños preliminares para el tubo de salida, tanto el propuesto por el cliente, designado como Alternativa 0, como los ideados en EMCON, Alternativas 1 y 2. El primer paso es, partiendo de estos conceptos, realizar los modelos que correspondan al diseño real que se va a someter a la simulación; el resultado puede verse también en el capítulo anterior.



Además, otro fichero contiene el modelo de la parte trasera del chasis de la plataforma PQ24 que alberga el sistema de referencia. Este archivo se emplea para establecer condiciones de contorno, tal y como se describe más adelante.

El procedimiento para preparar la simulación es el siguiente:

La primera tarea es importar dicha geometría al módulo de preproceso empleado, Hypermesh, mediante la función Import. Para ello se ha creado un archivo del tipo *.hm que contendrá la información del sistema y cada una de las alternativas de diseño, sobre el cual se va a trabajar. Antes de empezar a trabajar, al arrancar el programa, se abre una ventana en la cual es necesario especificar cuál es el perfil que se va a emplear. Hypermesh ofrece un amplio abanico de opciones, como pueden ser: (poner todas). Se hace la selección del perfil **Abaqus→Explicit** que será el programa de cálculo empleado. Una vez cumplido este primer requisito, se hace uso de la función **Import** y a continuación se seleccionan las opciones **Autodetect** e **Import Geometry**. Otras opciones permiten importar, por ejemplo, modelos de MEF. Ha de realizarse esta operación con cada uno de los ficheros de CATIA que contengan los modelos a mallar.

Una vez que se dispone, dentro del fichero *.hm, de la geometría del sistema y los diseños de los tubos de salida, se puede ordenar toda la información convenientemente desde la ventana **Model**. Se divide el modelo en partes mediante **Assembly Hierarchy → Create Assembly**, y se crean las siguientes: Marmita, Cola_std, Cola_alt0, Cola_alt1, Cola_alt2 que a su vez contendrán varios componentes cada una.

Las diversas entidades de un modelo se almacenan, en Hypermesh, en colectores que pueden ser de los tipos siguientes:

- Componentes: contienen datos de puntos, líneas, superficies y elementos.
- Propiedades: contienen información sobre ciertos tipos de componentes a los que se asocian.
- Materiales: soportan la información de cada material, y se vinculan a colectores componente o propiedad.
- Cargas: almacenan los datos referentes a cargas y restricciones.
- Otros: sistemas, vectores y vigas soportan datos referentes a tales entidades.



Los colectores de tipo componente que se crean a partir de la geometría importada se asignarán a la parte correspondiente de las mencionadas anteriormente.

Dado que la geometría puede resultar excesivamente compleja para realizar un mallado adecuado, es conveniente realizar operaciones de simplificación y adaptación de manera que después la malla sea satisfactoria. Para ello, en el menú **Geometry** se dispone de las funciones **Surface Edit**, **Edge Edit**, **Surface**, etc. mediante las cuales es posible crear nuevas superficies, cortar las existentes o eliminar bordes innecesarios. A la hora de realizar esta operación, se debe asegurar que existen todas las superficies requeridas, que están conectadas entre sí por un solo borde y no hay ninguna duplicada.

El siguiente paso es extraer las superficies intermedias de los sólidos de la geometría, lo cual se hace desde el mismo menú y la función **Midsurface**. Seleccionando la opción de extracción automática se obtienen buenos resultados en la mayoría de los casos, y de este modo van apareciendo componentes con la información de dichas superficies en la ventana de organización del modelo.

Una vez creadas todas las superficies intermedias sobre las cuales se realizará la malla, hay que definir el resto de características de todas ellas, para lo cual se crean diversos colectores de tipo propiedad a los que vincular cada uno de los componentes. En total se crean 17 propiedades diferentes, y después se emplea la herramienta **Component Browser** para establecer los vínculos correspondientes, que se muestran a continuación:

Propiedad	Tarjeta (tipo)	Componentes asociados
p_MT_envolvente	SHELLSECTION-COMPOSITE, espesores 0.5/0.5	MT_envolvente
p_MT_tubosint	SHELLSECTION, espesor 1.0	MT_tubo_del, MT_tubo_tras
p_MT_tapasext	SHELLSECTION, espesor 1.2	MT_tapa_del, MT_tapa_tras
p_MT_tapasint	SHELLSECTION, espesor 1.0	MT_tapas_int
p_varilla_tras	SHELLSECTION, espesor 1.5	varilla_tras
p_cola_std	SHELLSECTION, espesor 1.5	tubo_cola_std
p_cola_ant0	SHELLSECTION,	tubo_cola_ant0



	espesor 2.0	
p_cola_post0	SHELLSECTION, espesor 2.0	tubo_cola_post0
p_cola_ant12	SHELLSECTION, espesor 1.5	tubo_cola_ant1, tubo_cola_ant2
p_cola_post12	SHELLSECTION, espesor 1.0	tubo_cola_post1, tubo_cola_post2
conn_rigido*	CONNECTOR SECTION	MT_conns, soldadura_std, soldadura_0, soldadura_1, soldadura_2
p_masa*	MASS, valor 0.6	masa
p_muro_choque*	RIGID BODY	muro_choque
p_topes*	RIGID BODY	topes
p_anillo1*	RIGID BODY	anillo1
p_anillo2*	RIGID BODY	anillo2
p_anillo0*	RIGID BODY	anillo0

Se puede comprobar que la mayoría de las propiedades vienen definidas por la tarjeta SHELL SECTION y su correspondiente espesor, que define el tipo de superficie del componente como de membrana, puesto que una dimensión es significativamente menor que las otras dos. En el caso de la envolvente, formada por dos chapas de distinto material, se asigna además la opción COMPOSITE por constar de dos superficies superpuestas.

Estas propiedades tendrán asociado a su vez un material, a excepción de las marcadas con un asterisco, que son de los tipos CONNECTOR SECTION, MASS y RIGID BODY; esto es, elementos de conexión, masas y cuerpos rígidos.

Las propiedades asignadas a los diversos componentes están a su vez vinculadas a los colectores de material. Como se ha indicado en la descripción de los elementos del sistema, se emplean cuatro materiales diferentes que son los aceros inoxidables 1.4512, 1.4301, 1.4113 y 1.4404. Este último, sin embargo, no será considerado en el problema puesto que es el perteneciente a los anillos de malla de las Alternativas 0,1 y 2, y resulta más conveniente modelarlos de un modo diferente, que se describirá más adelante.

El modo de introducir las definiciones de los materiales es creando, en primer lugar, tres colectores “vacíos” de tipo material que no contienen ninguna información excepto el nombre de cada uno; estos colectores se asocian a las propiedades anteriormente descritas estableciendo los vínculos correspondientes.



La información requerida para el cálculo se encuentra en ficheros independientes y será invocada por Abaqus mediante la inclusión de un comando en el fichero principal, que habrá que editar manualmente más adelante. Ésta incluye las curvas completas de tensión-deformación, en las regiones elástica y plástica hasta la rotura, además de recoger los efectos de la velocidad de deformación y la variación térmica sobre la rigidez, según el modelo de Johnson-Cook.

6.2.2 Mallado

Una vez que se dispone de todas las superficies preparadas y revisadas, comienza el proceso de mallado, mediante el cual cada componente se dividirá en un determinado número de elementos sobre los cuales el programa de cálculo Abaqus Explicit realizará después la integración.

Esta operación de discretización es un paso importante para obtener buenos resultados en el análisis mediante el MEF, puesto que determinará en gran medida tanto la precisión del cálculo como el coste del mismo. Así, es necesario alcanzar una solución de compromiso entre ambos que garantice la fiabilidad de la predicción manteniendo un coste aceptable. Para lograrlo, existen diversas formas de afrontarlo, y hay que decidir acerca del tipo de malla a emplear en cada zona, el tipo de elementos más conveniente y también el tamaño de los mismos, que determinarán el número total de éstos que compondrán la discretización y por tanto también el tiempo empleado en el cálculo. La distribución de los elementos también ha de ser tomada en cuenta para evitar crear zonas conflictivas que podrían dar lugar a errores y desestabilizar el resultado.

Para comenzar, se selecciona el tipo de elementos que formarán la malla, en el menú **2D → Element types**. La librería de elementos disponibles en Abaqus/Explicit incluye los elementos de tipo “shell”, adecuados para estructuras de membrana en las cuales la dimensión del espesor es significativamente más pequeña que las otras dos, que son las presentes en el caso en estudio. Se eligen elementos de membrana convencional, que se definen mediante una superficie de referencia –las superficies medias anteriormente extraídas– y poseen grados de libertad traslacionales y rotacionales, mientras que el espesor se define como una propiedad de la sección. Por contra, la membrana continua discretiza un cuerpo completamente tridimensional, determinando el espesor a partir de la geometría de los nodos, y sólo tiene grados de libertad traslacionales. Así pues, dado que la malla estará compuesta por elementos

triangulares y rectangulares, identificados en Hypermesh como tria3 y quad4, les asignaremos respectivamente los tipos de elementos S3R y S4R.

El convenio adoptado para nombrar los elementos es como se muestra a continuación:

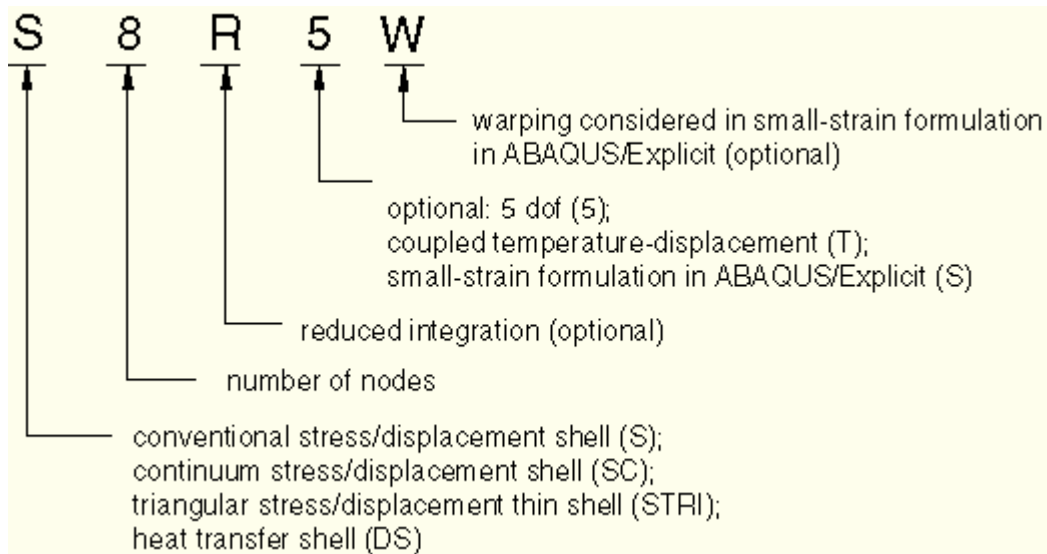


Fig 6.1 Convenio para nomenclatura de elementos

De manera que el tipo S3R corresponde a elementos de membrana convencional, de 3 nudos e integración reducida, y S4R análogamente pero con 4 nudos. La integración reducida generalmente devuelve resultados más precisos y reduce significativamente el tiempo de cálculo. Ambos tipos emplean interpolación lineal, permiten cargas mecánicas y grandes deformaciones; pueden emplearse en cálculos tanto estáticos como dinámicos.

Para ir realizando el mallado de cada superficie, se hace uso de la función **2D → Automesh** escogiendo el tipo de malla rectangular o mixta, en la cual mezcla rectángulos combinados con triángulos en determinadas zonas para evitar distorsión. El tamaño elegido es de 10mm, que pese a ser mayor que en ciertos cálculos como los de tensiones, anteriormente ha demostrado entregar buena precisión para problemas de impacto. Así se consigue que los incrementos de tiempo no sean demasiado pequeños y se evita un excesivo coste computacional.

Si el aspecto de la malla recién creada no es bueno, se puede ir variando el número de elementos o el biasing, además de practicar cortes a la superficie en cuestión o seleccionar un conjunto concreto de elementos y remallarlos. Es importante verificar

que las superficies que están en contacto poseen cada una el mismo número de elementos en la intersección para que la malla esté conectada adecuadamente.

Además, las geometrías correspondientes a todos los modelos de tubo de cola mostraban únicamente la mitad del componente, dado que todos presentan simetría. En el momento de discretizarlos, sin embargo, es necesario crear la malla completa, y para ello se emplea **Tool → Reflect**. Así se duplican todos los elementos seleccionados respecto del plano de simetría.

Tras haber mallado todas las superficies necesarias, hay que verificar la calidad de la malla para asegurar que no se presentarán problemas en el cálculo. Para ello, se emplea **Tool → Check Elements**. Se puede realizar una comprobación de los elementos a través de una serie de variables:

- Warpage mide la desviación del elemento respecto del plano.
- Skew y Taper indican la desviación respecto de la forma cuadrada mediante la relación entre ángulos y lados.
- Chord Dev mide la adaptación de la malla a las zonas curvadas mediante la relación entre longitud de cuerda y radio de curva.

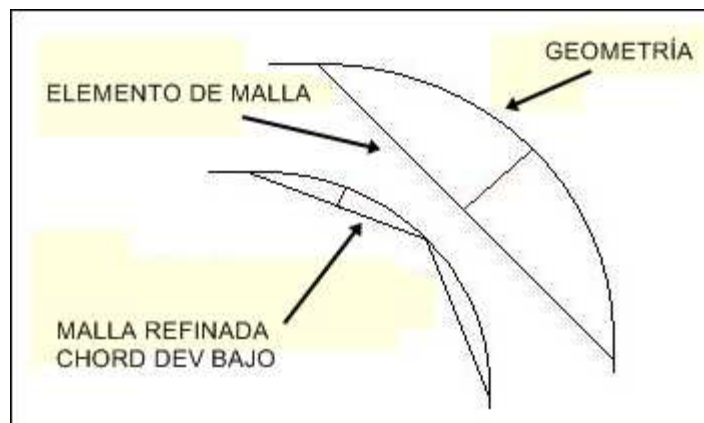


Fig 6.2 Explicación gráfica de Chord Dev

- Min/Max angle revela los elementos que incumplen: para trias → $20^\circ < \text{angle} < 120^\circ$; para quads → $45^\circ < \text{angle} < 135^\circ$.
- Jacobian expresa el nivel de optimización respecto del cálculo matricial y debe ser próximo a 1.



Otra comprobación que se puede hacer con la misma herramienta es que no existan elementos duplicados. Además, **Tool → Edges** permite comprobar la conectividad; mediante **preview equiv** y **equivalence** aparecen remarcadas las posiciones en las cuales existen dos nudos muy cercanos, y estableciendo una tolerancia de 0.1mm se convierten las parejas de nudos dentro de ese valor a un solo nudo. Concretamente, en las intersecciones de las superficies de los tubos de cola con sus planos de simetría aparecerán todos los nudos duplicados que se han generado al emplear Reflect.

Se verifica que las normales de todos los elementos corresponden a una misma dirección con **Tool → Normals** y en caso de no ser así se seleccionan los elementos o superficies conflictivos y se ajusta la normal.

Visualmente es cómodo realizar un último test con **2D → Qualityindex**. Así, Hypermesh realiza una revisión automática de la malla en la zona especificada y la muestra en un tono neutro donde destacan los elementos que presentan alguna advertencia o fallo, que aparecen coloreados según el siguiente código:

- Azul (Warn): Las advertencias, en color azul, por lo general son admisibles y la mayoría de las aparecidas son elementos con tamaño ligeramente pequeño respecto a los 10mm establecidos. Ralentizarán algo el cálculo, pero sin producir fallos en el mismo.
- Amarillo (Fail): Los elementos que aparezcan en amarillo presentan fallos que pueden dar lugar a cierta inestabilidad. Es importante minimizarlos para evitar resultados indeseados.
- Rojo (Worse): Estos elementos presentan valores excesivos de alguno o varios de los parámetros antes mencionados y su presencia puede dar lugar a grandes desviaciones del resultado o errores que detengan el cálculo. Deben evitarse a toda costa.

Cuando aparecen elementos coloreados, puede remallarse la superficie o zona que los contiene, o bien pueden retocarse en el momento gracias a las funciones **place node**, **swap node**, **node optimice**, **element optimice**. En total, tras el refinamiento de la malla completa, se ha limitado a algunos elementos mostrados en color azul (con advertencias), con lo que se espera de la malla un resultado fiable.

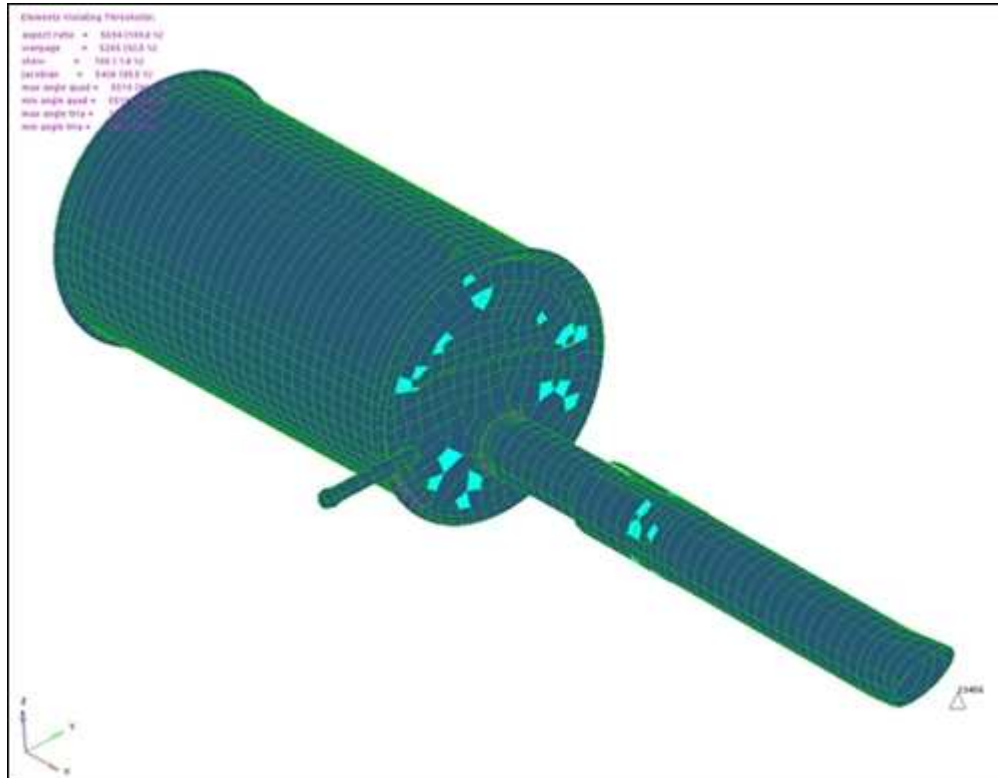


Fig 6.3 Test de optimización mediante *QualityIndex*

La operación de discretización se basa en la reiteración entre mallado, inspección y remallado. Así, tras sucesivas comprobaciones y mejoras añadidas, se consigue un resultado final correcto que permita realizar un cálculo preciso y eficiente. Tras seguir este proceso, se obtienen los siguientes modelos:

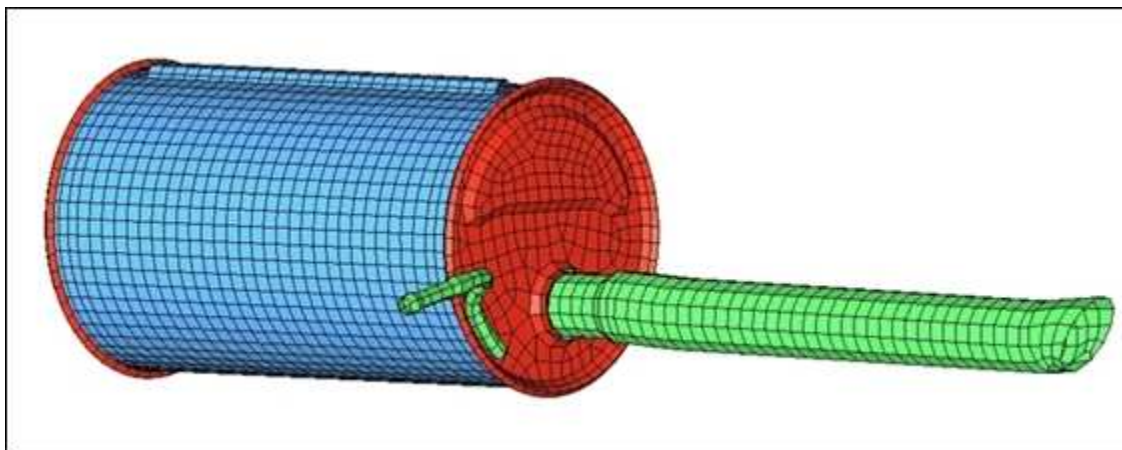


Fig 6.4 Malla de la marmita y el tubo de salida original

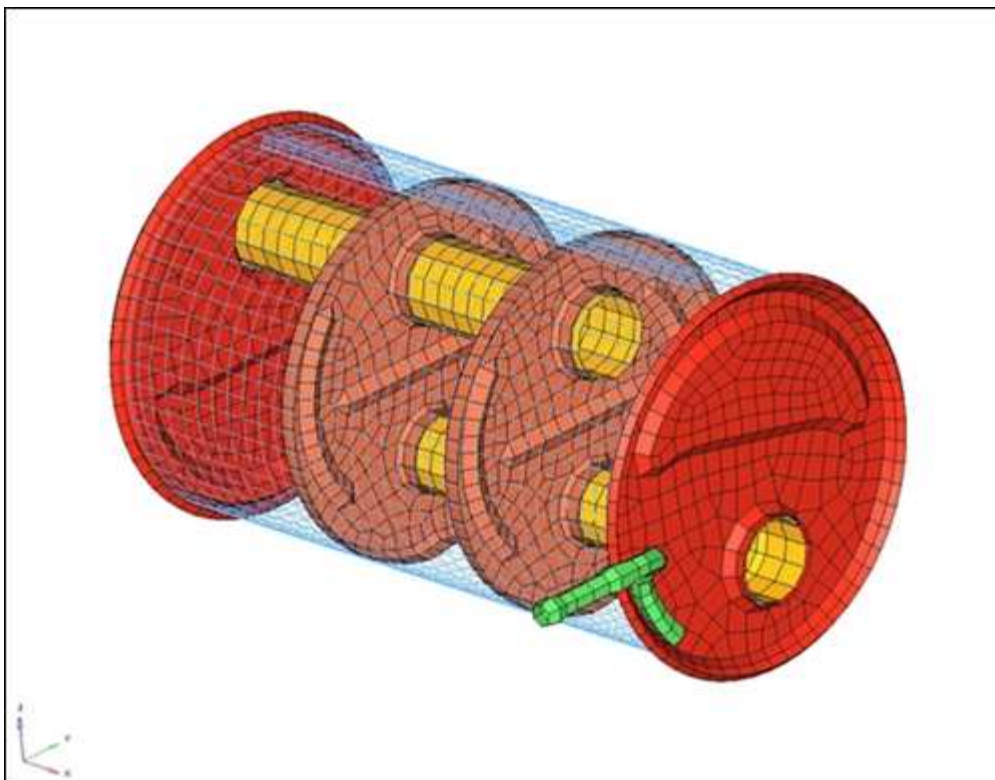


Fig 6.5 Malla de elementos interiores de la marmita

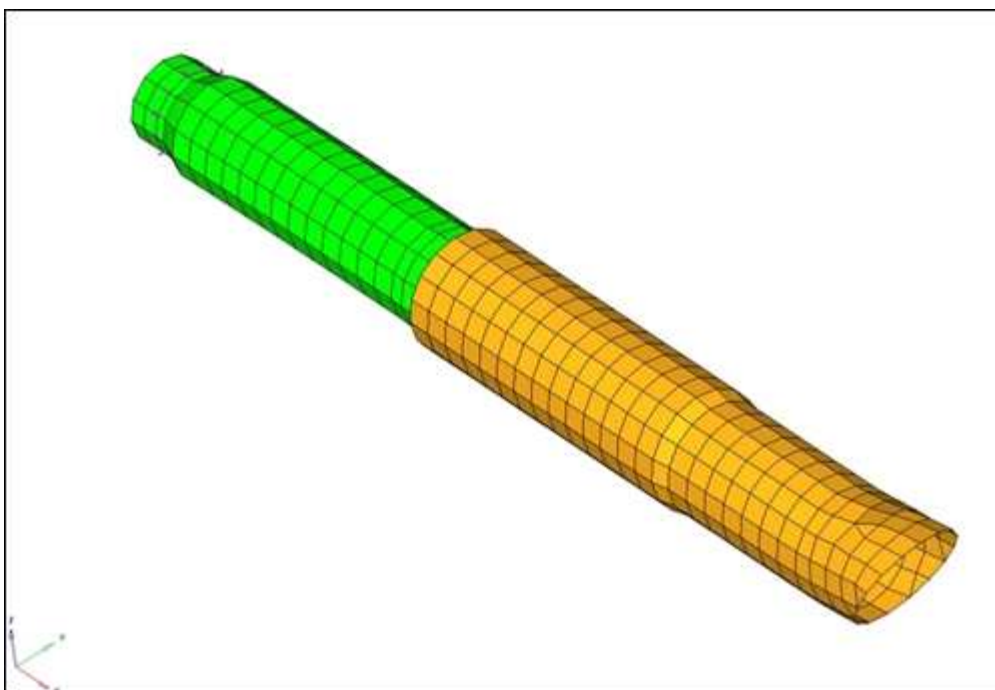


Fig 6.6 Malla de Alternativa_0

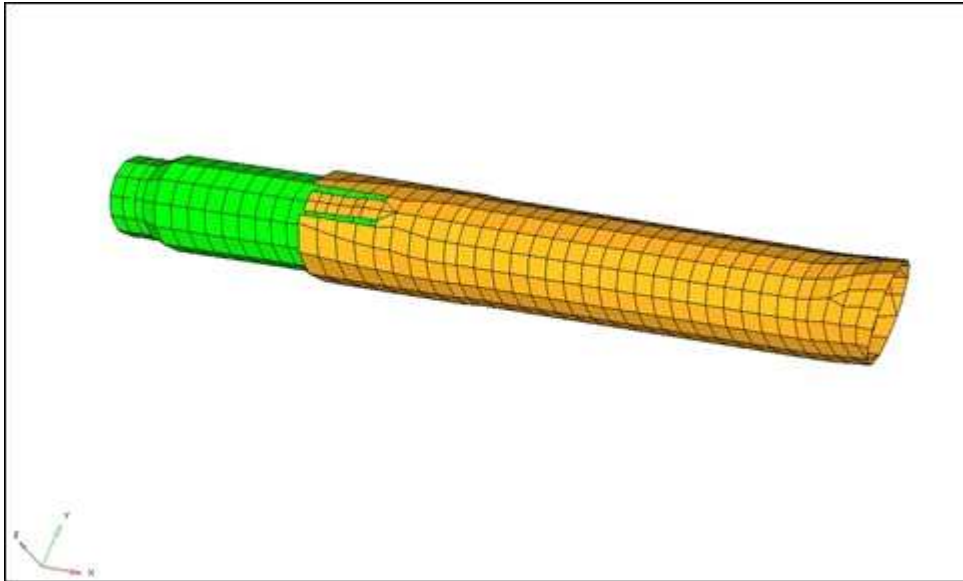


Fig 6.7 Malla de Alternativa_1

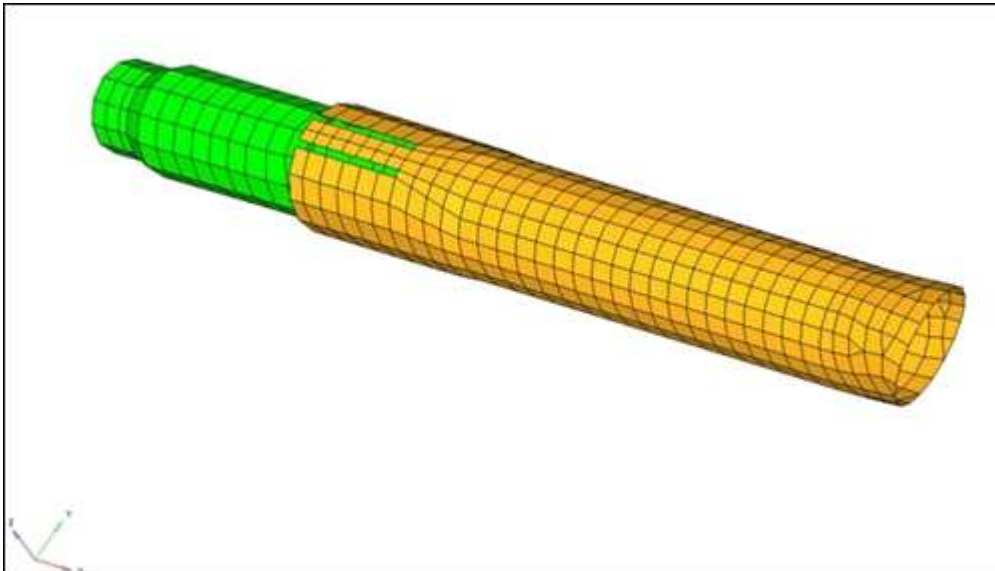


Fig 6.8 Malla de Alternativa_2

Además de los elementos que conforman la malla de los componentes del sistema, se han de modelar también otras entidades como son las conexiones entre componentes, las masas de algunos elementos, y las condiciones de contorno, dentro de las cuales se encuentran el muro de impacto y los topes limitadores del desplazamiento mencionados al comienzo del apartado.

Para representar estas entidades se emplean otro tipo de elementos diferentes a los usados en el resto de la malla, que en Abaqus se conocen como inerciales, rígidos o conectores, entre otros. Cada uno de estos tipos presenta una definición diferente que lo hace más adecuado para una tarea concreta; todos ellos se distinguen de los elementos



estructurales tipo membrana shell ya descritos en que carecen de una asignación de material, y sus propiedades quedan definidas mediante distintos parámetros.

En el caso de la pared incidente sobre el sistema, así como de los topes que la detendrán y los anillos en los tubos de salida, se emplean elementos rígidos. Concretamente, el tipo usado es el R3D4, que corresponde a un elemento tridimensional con forma de cuadrilátero. Así pues, tras seleccionar este tipo, se deben crear dichos elementos, cada uno a partir de 4 nudos previamente definidos en las posiciones deseadas. Para ello, **2D → Edit Element** y después se asigna un nudo de referencia para los topes y otro para el muro. Éste último se sitúa por detrás del propio elemento rígido para que, durante el impacto, no entre en contacto con el sistema interfiriendo en el cálculo.

La pared incidente se situará en una posición muy próxima al punto más posterior del tubo de cola, de manera que el cálculo se centre en lo que sucede durante el contacto de ésta con el sistema, y no durante el recorrido de caída libre anterior. Así se evita alargar excesivamente el cálculo, puesto que se puede determinar con facilidad el comportamiento del sistema en los instantes previos al impacto: cayendo desde una altura determinada, el muro alcanzará una cierta velocidad justo antes de hacer contacto con el sistema. En este caso se ha tomado un valor concreto de velocidad y se determinará la altura desde la que es necesario soltar el muro.

Por otro lado, la posición de los topes se determina mediante la geometría del chasis de la plataforma PQ24. En caso de colisión, el tubo de salida del sistema de escape puede ser alcanzado por otro vehículo ó un objeto, pero la distancia durante la cual ambos mantienen el contacto se ve limitada por otros elementos contra los cuales impactaría instantes después. Mediante el modelo 3D que contiene la geometría, se determina que tal distancia es de 100mm. Concretamente se ha tomado la distancia entre el final del tubo de cola y el larguero más atrasado del chasis, en vez del paragolpes; de este modo se obvia la acción de éste último, que también absorbería energía del impacto, pero se simplifica el cálculo mediante el uso de elementos infinitamente rígidos para los topes que simulan la presencia del chasis. A continuación se puede ver representada la geometría de la parte trasera del vehículo y el sistema de escape cuyo tubo de cola sobresale del mismo:

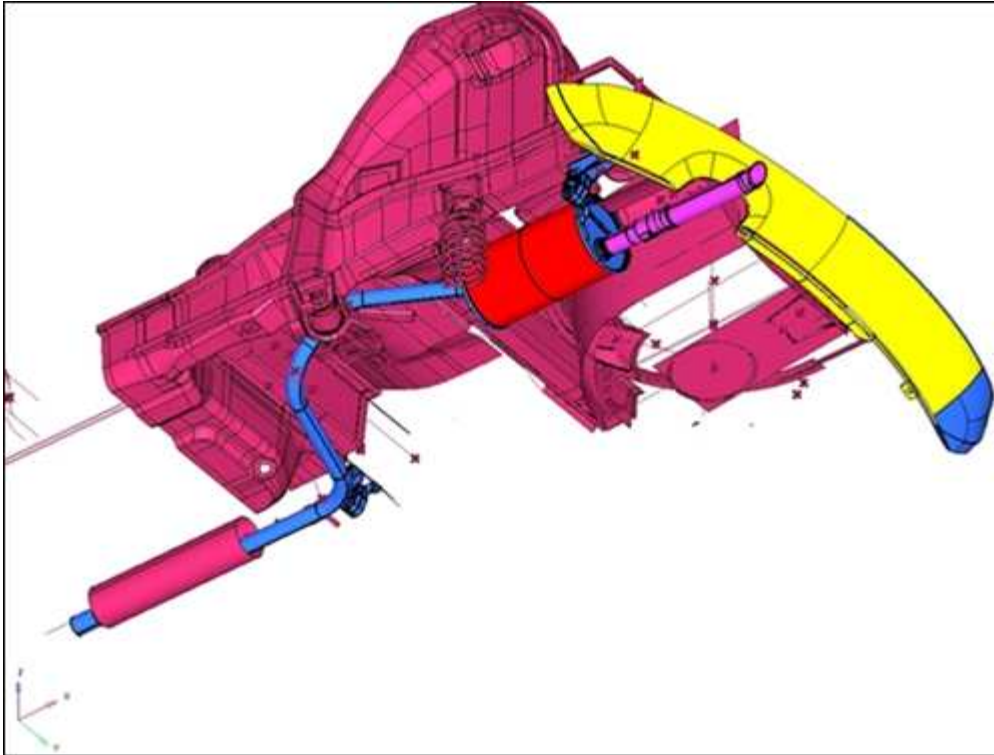


Fig 6.9 Vista inferior del chasis y sistema de escape base

Para representar los topes y los anillos se emplea el método anterior, creando nudos auxiliares en las posiciones deseadas, y después definiendo elementos cuadrados del tipo R3D4. Se emplea un único nudo de referencia para los cuatro topes que se sitúa suficientemente alejado del sistema de manera que no interfiera en el cálculo en ningún momento.

Puesto que los elementos rígidos empleados no poseen definición de material, tampoco poseen un valor para su masa. Éste valor no es relevante para los topes, pero sin embargo es necesario definirlo para la pared incidente. Para asignar dicho valor, que se fija en 600kg, hay que crear un nuevo colector al cual se le asigna la propiedad masa y se introduce el valor deseado. Después, mediante el menú **1D → mass** se crea un elemento masa perteneciente a dicho colector, situado sobre el nudo de referencia del muro. Los valores de masa de otros elementos rígidos, como por ejemplo las soldaduras, se desprecian por no tener excesiva incidencia en el resultado.

Finalmente, se han de incluir las entidades que representan los puntos y cordones de soldadura, para lo cual se emplean elementos del tipo CONN3D2, esto es, conectores de tres dimensiones y dos nudos. En este momento se hace evidente la necesidad de haber cortado las superficies de tal modo que se creen líneas de nudos paralelas o concéntricas, de tal manera que los elementos conectores representen adecuadamente la



unión de dos puntos próximos. Puesto que cada variante de diseño cuenta con geometrías diferentes, se crean colectores distintos para cada conjunto de soldadura y se ubican dentro de sus correspondientes “assembly”, para después crear mediante **1D → rods** todas las uniones entre nudos necesarias para cada modelo.

Los elementos conectores otorgan la capacidad de representar diversas condiciones y por ello es necesario especificar sus características, de modo que se crea la propiedad “conn_rigido”, a la cual se asocian todos los componentes de soldadura. Esta propiedad especifica que los conectores empleados serán de tipo BEAM, esto es, uniones rígidas entre dos nudos. Existe la posibilidad de emplear otros tipos para representar, por ejemplo, la rotura de la conexión ante determinadas condiciones, pero no se ha considerado apropiado en este caso.

6.2.3 Condiciones de contorno, contacto y parámetros de cálculo

Una vez definido el sistema, el siguiente paso es crear las condiciones de contorno y condiciones iniciales del problema. Tendremos las siguientes: restricciones de los grados de libertad del muro, marmita y topes; velocidad inicial del muro y acción de la gravedad.

Para representar las primeras, se emplea el menú **BCs → Create Constraints** y se selecciona en cada caso el nudo correspondiente y los grados de libertad a fijar. Para el muro y los topes se toman sus respectivos nudos de referencia y se fijan todos los grados de libertad menos el 1 (desplazamiento en x) en el primero. La marmita se considera empotrada por su extremo anterior, de modo que se crea un nudo en una posición algo más adelantada y sobre éste se impone una restricción a todos los grados de libertad. Posteriormente se emplean conectores rígidos, iguales a los de la soldadura, que lo unen con cada uno de los nudos del cerramiento de la tapa delantera sobre la envolvente.

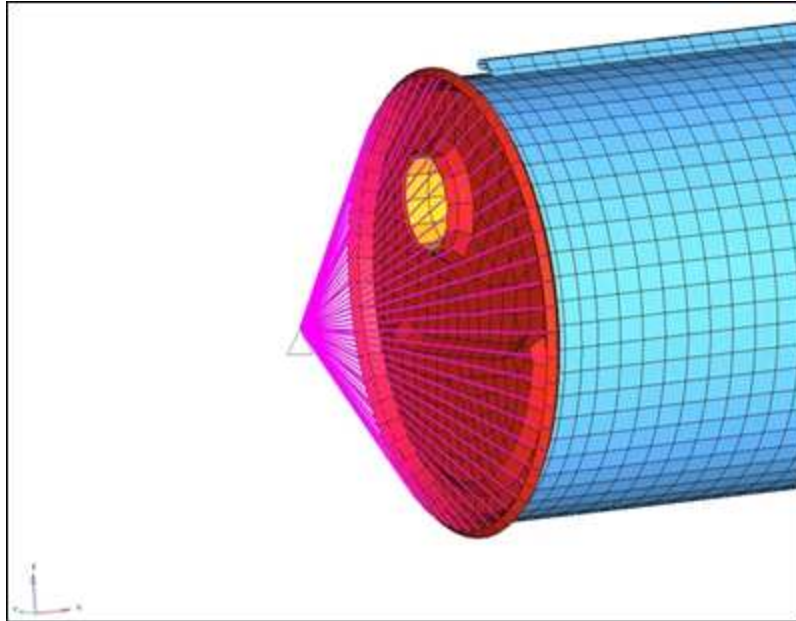


Fig 6.10 Empotramiento

La velocidad inicial y la gravedad se introducen creando colectores de carga y seleccionando **card image = Initial Condition**. Luego, para establecer la velocidad inicial se selecciona la opción “type: velocity” y se aplica al primer grado de libertad del nudo de referencia del muro de choque, con un valor de 4m/s. La gravedad se aplica a todo el sistema, también sobre el grado de libertad correspondiente al eje x.

Los últimos pasos antes de lanzar el cálculo en Abaqus/Explicit son establecer las interacciones que pueden darse lugar entre distintos elementos y determinar cómo ha de realizarse el cálculo así como los datos que se esperan obtener de la solución.

La primera parte se realiza mediante una herramienta útil y de manejo sencillo: **Contact Manager**. Se ha de definir la acción del rozamiento entre superficies, y precisar cuáles son las que pueden entrar en contacto. Existen diferentes maneras de representar esto, y la escogida es emplear un algoritmo de contacto general, que ha demostrado funcionar correctamente en cálculos anteriores de características similares. Así, se considera el posible contacto entre todas las superficies presentes, así como con ellas mismas, y si es necesario, se realiza alguna exclusión.

Primero se crea una nueva interfaz del tipo “general contact” y luego una interacción superficial de tipo “friction”, donde especificamos el tipo de rozamiento, que será fricción de Coulomb con un valor $\mu = 0.15$.



El último paso que se realiza en el programa de preproceso Hypermesh es definir lo que se conoce como Step, esto es, la configuración del cálculo y los pasos de que constará. Para resolver este problema el cálculo se realiza en un único paso, puesto que solamente existe una acción, que es la caída libre del carro sobre el sistema en estudio. Al igual que en la definición de contacto, existe una herramienta que facilita esta labor: **Step Manager**. Mediante ella, se crea un nuevo step al que se nombra “choque” y se especifica que se trata de un cálculo dinámico y explícito, con las condiciones de contorno e iniciales antes creadas, así como la interacción de rozamiento. Así mismo, se introduce el valor de la duración del cálculo, que se fija en 0.1s.

Por otro lado, se define el “Output Block”, el conjunto de resultados que se desean obtener. Existen dos tipos de output: **field** y **history**. En field, se recogen los resultados que quedarán representados sobre cada elemento del modelo, permitiendo una rápida visualización de las zonas críticas, y pudiendo crear videos que capturen la evolución de una variable en cada parte del sistema. Los datos de tipo history responden a valores en determinados nudos que podrán representarse en gráficas frente al tiempo u otras variables.

Se piden, para todos los elementos, los resultados de tipo field correspondientes a las variables S (tensiones) y E (deformaciones). Se obtendrán estos valores 40 veces a lo largo del cálculo (40 fotogramas).

En el campo de resultados del tipo history, se piden los datos de desplazamiento, velocidad y fuerza de reacción para el nudo de referencia del muro de choque, así como valores de las diversas variables de energía:

- ETOTAL: energía total del sistema, definida como $ALLKE+ALLIE+ALLVD+ALLFD+ALLIHE-ALLWK-ALLPW-ALLCW-ALLMW-ALLHF$.
- ALLAE: energía interna artificial empleada para el control de efectos de hourglassing, debe ser baja para que el resultado sea fiable.
- ALLFD: energía total disipada por efectos de fricción.
- ALLIE: energía de deformación total, definida como $ALLSE+ALLPD+ALLAE+ALLCD+ALLDMD+ALLDC+ALLFC$



- ALLKE: energía cinética.
- ALLPD: energía disipada por deformación plástica.
- ALLSE: energía de deformación elástica, recuperable.
- ALLWK: trabajo de las fuerzas externas.
- ALLDMD: energía disipada mediante el fallo de material.

Se fija la frecuencia de obtención de estos resultados en 100, lo cual otorgará un valor para cada variable cada 10-3 s.

Habiendo definido por completo el modelo y los parámetros de cálculo mediante Hypermesh, se deben crear los ficheros que servirán al programa Abaqus como datos de entrada. Mediante **Export** es posible pasar toda esta información e archivos del tipo .inp, y se crean tantos como distintos diseños se han de probar, seleccionando en la ventana de modelo las entidades correspondientes en cada caso y exportando con la opción “Displayed”, que solamente considera los elementos mostrados en la ventana de visualización.

Posteriormente hay que realizar ciertas modificaciones en dichos ficheros mediante un editor de texto, para sustituir las definiciones de material, que solamente contienen el nombre, con la orden ***INCLUDE** que hace referencia a los ficheros con datos de material antes mencionados. Además, habrá que añadir en field output, las variables PEEQ y STATUS a las ya introducidas S y E. PEEQ es la deformación plástica equivalente [...] STATUS es la variable que almacena el valor de fallo del elemento, esto es, si en algún elemento el material llega a fallar, según los criterios establecidos en la definición del mismo, la variable STATUS para dicho elemento toma el valor 0, y en caso contrario, 1. Esto permitirá además personalizar las vistas durante el postproceso mostrando u ocultando los elementos que han fallado.

Una vez que el fichero .inp correspondiente se ha creado y editado convenientemente, se lanza el cálculo y automáticamente Abaqus crea una serie de archivos que contienen información sobre el estado del mismo. El archivo .dat contiene los datos de carga del input en el programa, y puede comprobarse si han surgido errores o hay avisos importantes. Si el cálculo se detiene por algún motivo, puede consultarse también el fichero .msg, y mientras se está ejecutando, es posible seguir su evolución



mediante el .sta. Para visualizar los resultados, se crea otro con terminación .odb que puede abrirse mediante la aplicación Abaqus Viewer.

6.3 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

El módulo de postproceso permite visualizar los datos extraídos del cálculo desde diversas perspectivas, obteniendo información muy valiosa. En primer lugar se analiza el propio método empleado en el preproceso, para confirmar que otorga resultados realistas, y en segundo lugar pasan a analizarse las diversas alternativas de diseño conforme al modelo más adecuado.

6.3.1 Verificación del modelo

Los primeros resultados que arrojan el cálculo deben ser analizados de manera crítica. Como se ha mencionado, el método de virtualización del problema es, en cierto sentido, experimental, haciendo necesario al revisar estos datos juzgar si se ha planteado bien desde el inicio.

Existe un antecedente de simulación de impacto sobre el sistema de escape en el cual se ha basado este proyecto, sin embargo hay un elemento claramente diferenciador que tendrá gran influencia en el planteamiento: el anillo de malla empleado en los tubos de salida flexibles. La dificultad para modelar tal objeto de manera representativa, y la falta de datos suficientes acerca del material que lo compone, acero inoxidable 1.4404, exige una aproximación diferente.

Un primer intento se basa en la utilización de un algoritmo de interacción entre superficies denominado en Abaqus como **CONTACT PAIR**. Se crean dos superficies basadas en conjuntos de elementos del tubo interior y exterior, asignando la relación entre espesores correspondiente a la sección del anillo mediante la opción Scale Thick.

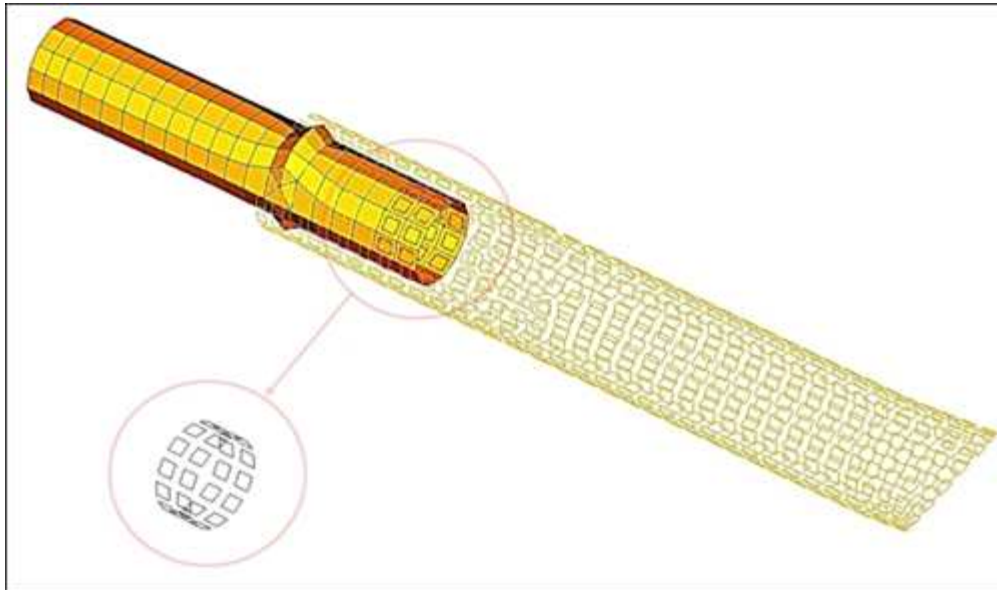


Fig 6.11 Superficies empleadas en el algoritmo Contact Pair

Después se define el algoritmo de contacto entre ambas superficies asignando el tipo de interacción como “friction”, siendo rozamiento de Coulomb con valor $\mu = 0.15$ como ya se había especificado antes mediante la herramienta **Contact Manager**. El objetivo es que la superficie ficticia que representa el anillo ejerza una fuerza de rozamiento sobre el tubo exterior limitando su desplazamiento. Sin embargo, tras realizar el cálculo, se desecha la opción al comprobar que el comportamiento no es real: el tubo exterior se desplaza en el eje Z hasta llegar incluso a hacer contacto con el tubo interior.

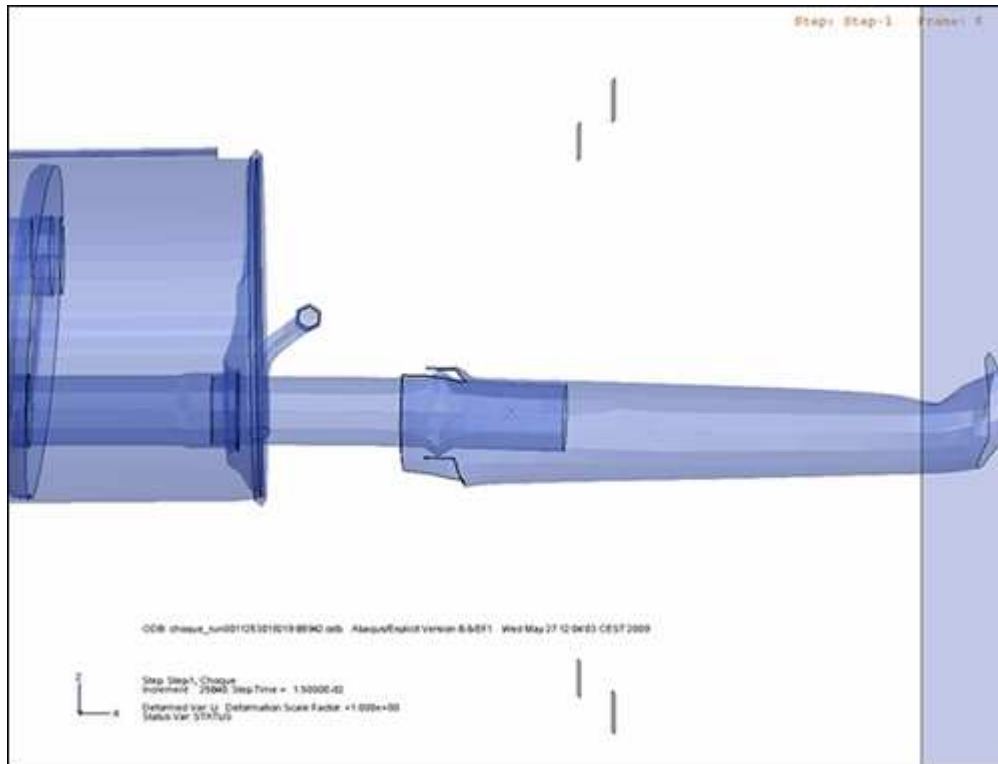
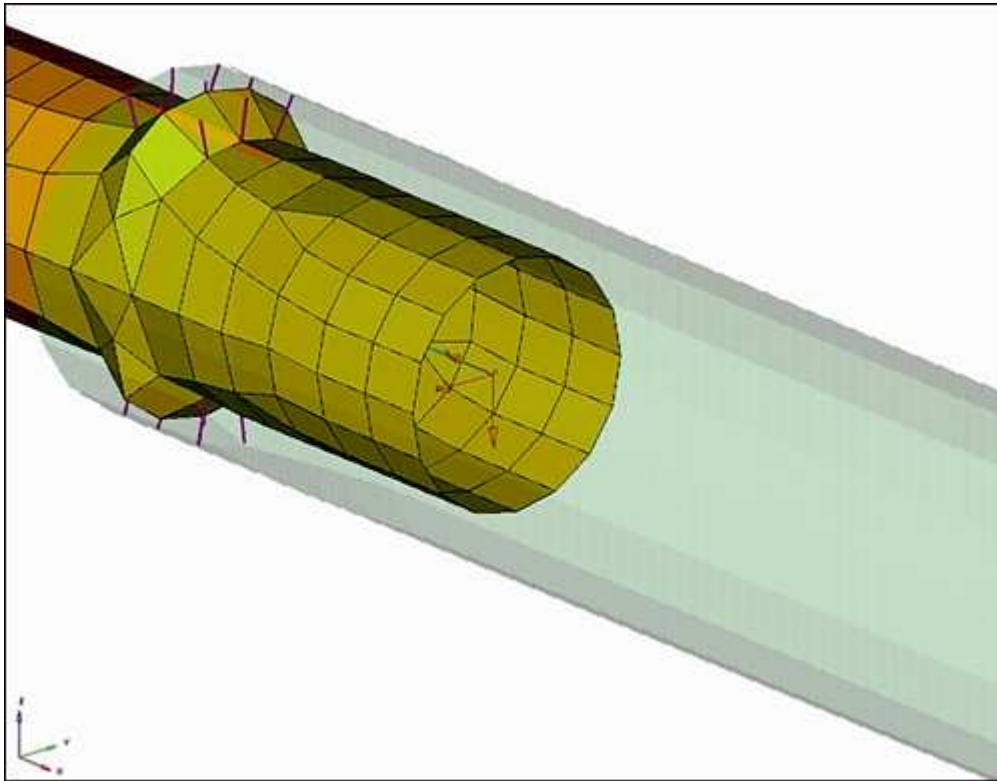


Fig 6.12 Resultado de la primera versión de anillos

Se crea una segunda versión, esta vez empleando un elemento conector **CONN3D2** de tipo **CYLINDRICAL**, que impone las restricciones cinemáticas **SLOT** y **REVOLUTE** entre dos nudos. **SLOT** restringe el movimiento de ambos a una línea definida por la orientación del primer nudo y la posición del segundo; **REVOLUTE** limita la rotación relativa al eje que une ambos nudos.



***Fig 6.13** Conector tipo Cilíndricas y orientación del primer nudo*

Para cada nudo se establece una restricción tipo **COUPLING, DISTRIBUTING** que determina el comportamiento de dos superficies, una generada con los nudos del tubo interior en la zona del anillo y gobernada por primer nudo del elemento conector, otra generada con los nudos del tubo exterior en la misma zona y gobernada por el segundo nudo del conector. En un principio parece comportarse mejor, pero la restricción actúa sobre una sección pasante, lo cual distorsiona el movimiento, obteniendo un resultado final similar:

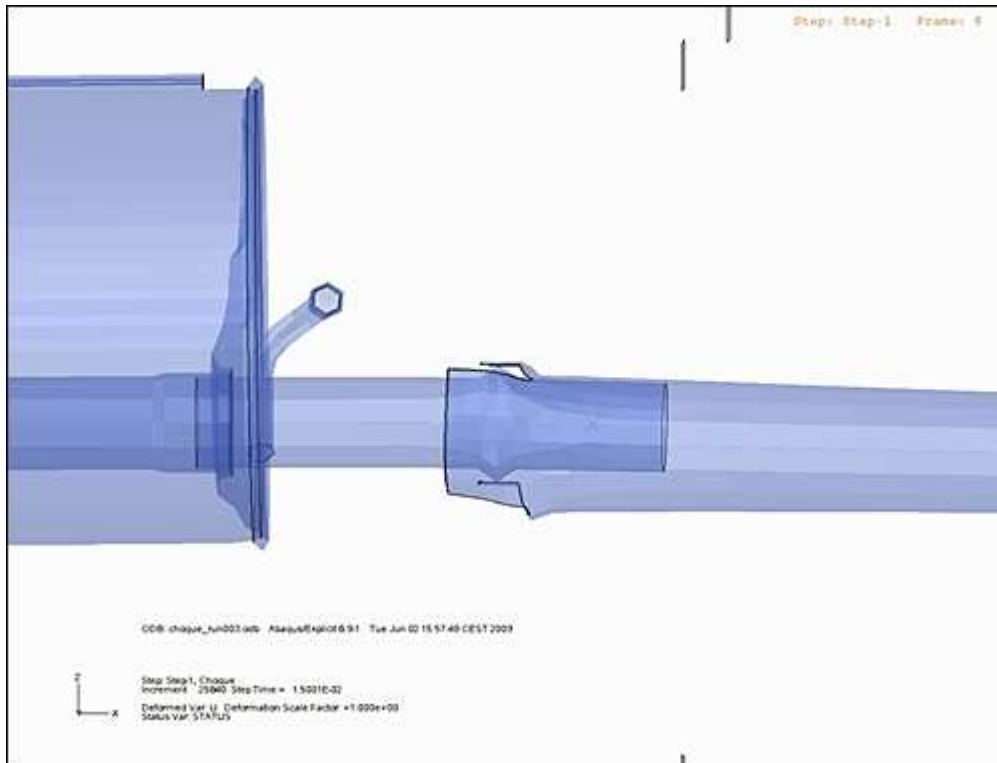


Fig 6.14 Resultado de la segunda versión de anillos

Finalmente, se opta por la solución de mallar los anillos como elementos rígidos de la manera que se ha descrito en el apartado 4.3.4, quedando de la siguiente forma:

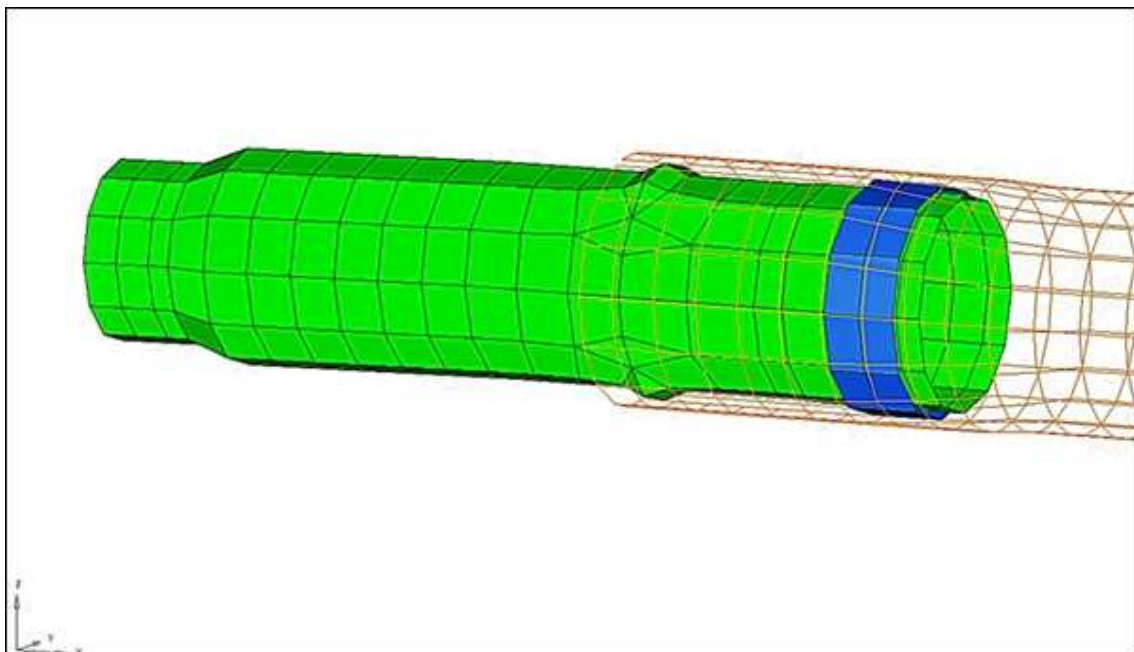


Fig 6.15 Anillo mallado con elementos rígidos

El resultado con esta tercera versión es mucho más satisfactorio:

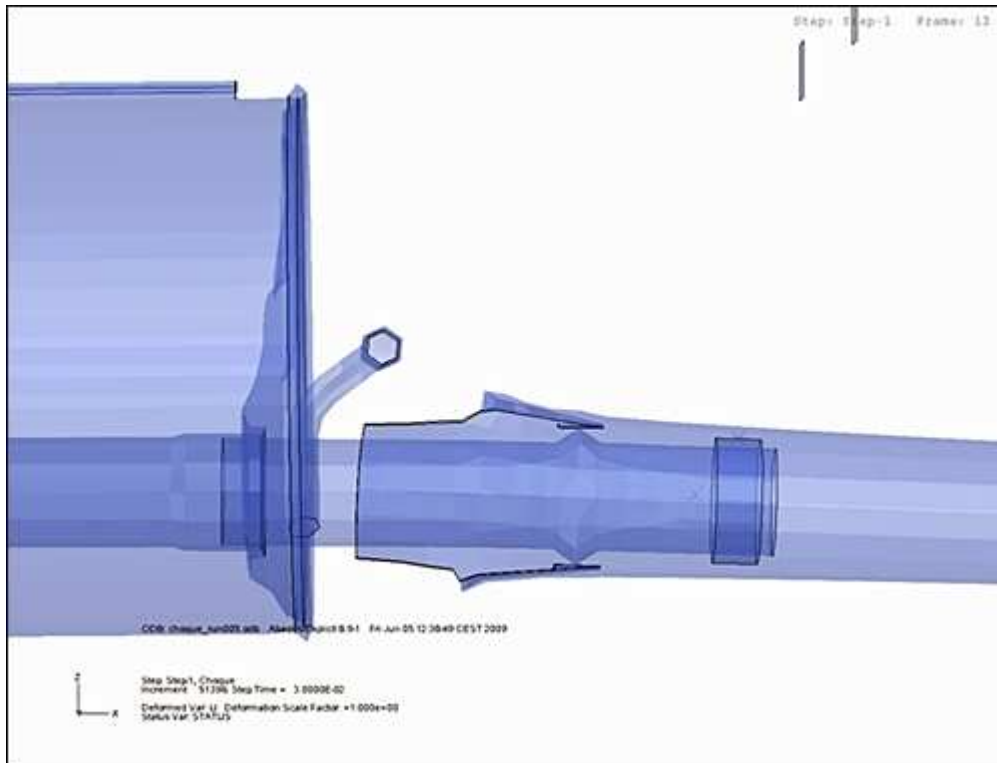


Fig 6.16 Resultado de la tercera versión de anillos

6.3.2 Obtención de resultados y optimización

Empleando este último método para representar la acción de los anillos de malla en el problema, se someten al cálculo tanto al sistema con el tubo de salida original como a las Alternativas 0, 1 y 2.

Tubo original

En primer lugar se observa el gráfico de variación de energías en el modelo, para verificar que el análisis es válido. Debe mantenerse constante, o prácticamente, el valor de la energía total, que será la suma de las energías interna y cinética menos el trabajo externo. Por otro lado la variación de la energía “artificial” debe ser pequeña respecto a la de energía interna:

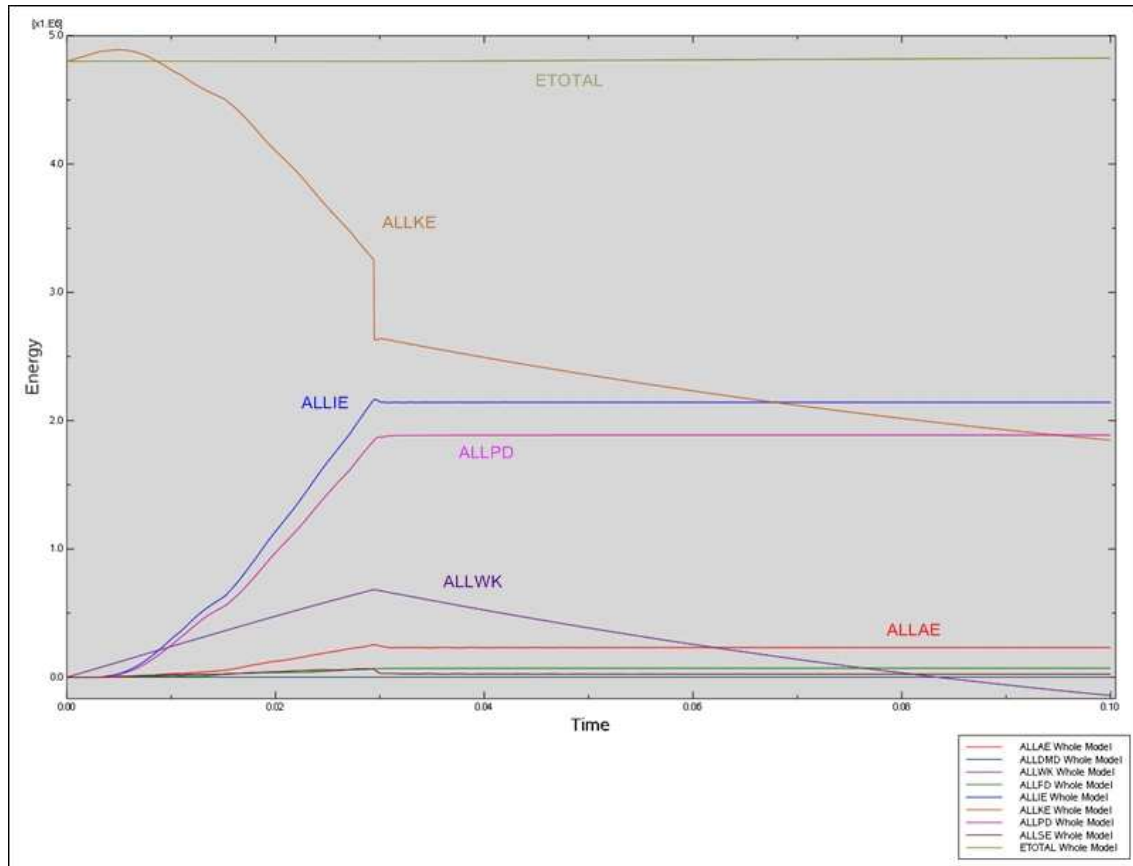


Fig 6.17 Tubo original: balance de energía. Ordenadas [kJ], Abscisas [s]

Puede apreciarse que efectivamente la energía total permanece constante con un valor de 4.8 kJ y la energía artificial alcanza un nivel muy bajo. La energía cinética, que aumenta ligeramente al comienzo debido a la gravedad, va transformándose en energía interna, la mayor parte de la cual es energía de deformación plástica. El tubo de salida y la marmita quedan muy deformados:

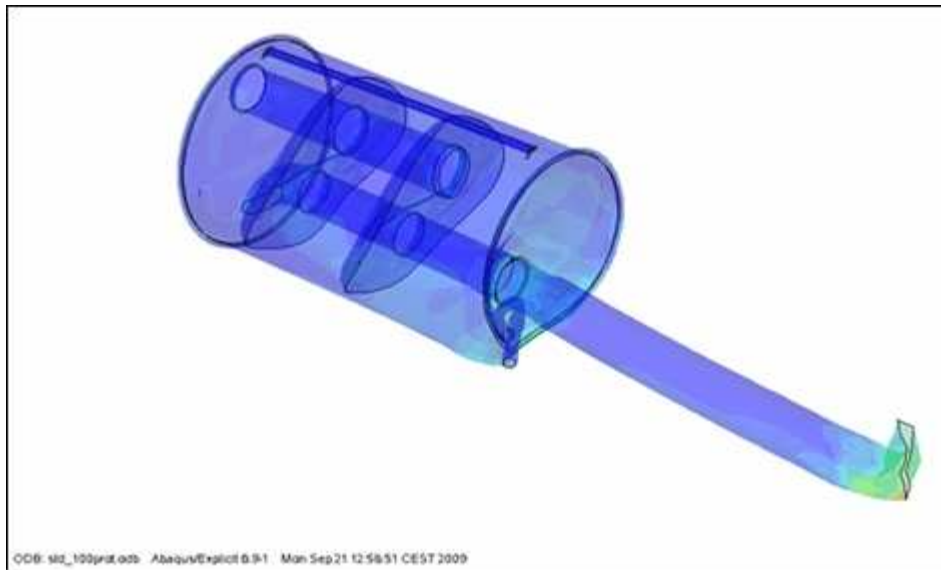


Fig 6.18 *Tubo original: estado final de marmita y tubo de salida*

Se obtienen, a modo de referencia, los valores de tensión y desplazamiento en un elemento -y uno de sus nudos- situado en la región de salida de la marmita, que ha resultado muy afectada. El elemento es el 160452 y el nudo el 165462.

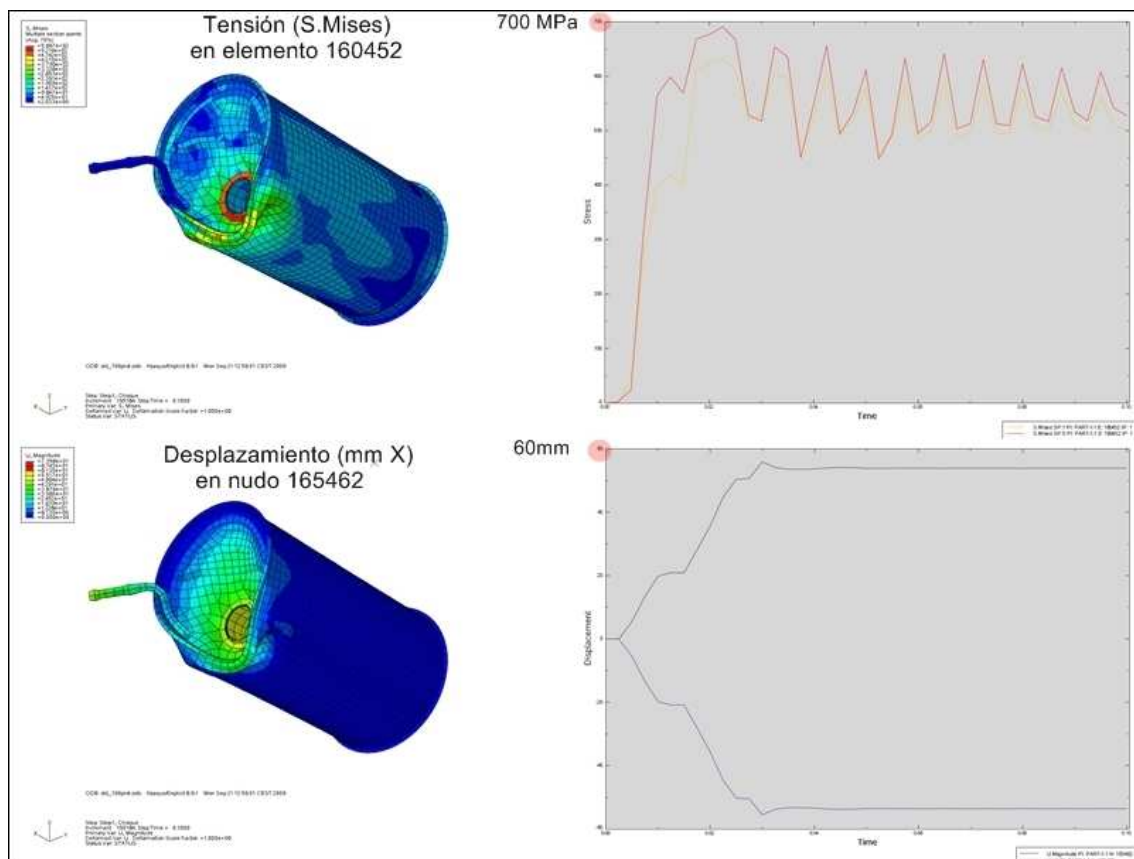


Fig 6.19 *Tubo original: tensión y desplazamiento en el punto de referencia*

Se registran valores de tensión de más de 600 Mpa y desplazamientos de hasta 55mm en el eje X. La marmita queda inservible.

Alternativa 0 (propuesta de cliente)

En este caso el gráfico del balance de energías es claramente diferente:

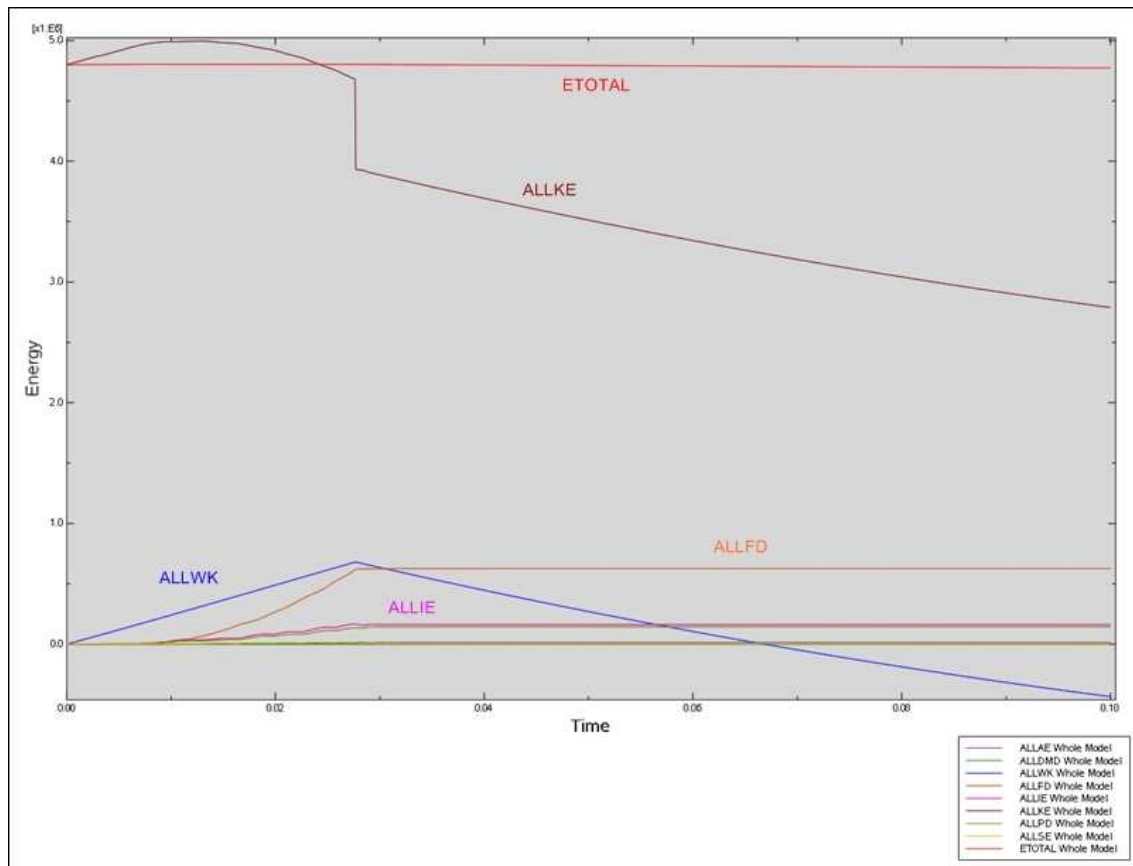


Fig 6.20 Alternativa 0: balance de energía. Ordenadas [kJ], Abscisas [s]

La energía cinética crece en mayor medida y prácticamente mantiene el valor inicial en el instante del impacto del muro con los topes. La disminución que experimenta se traduce en un incremento de la energía disipada por efecto de la fricción, mientras que la energía interna alcanza un valor bastante bajo. El resultado es el siguiente:

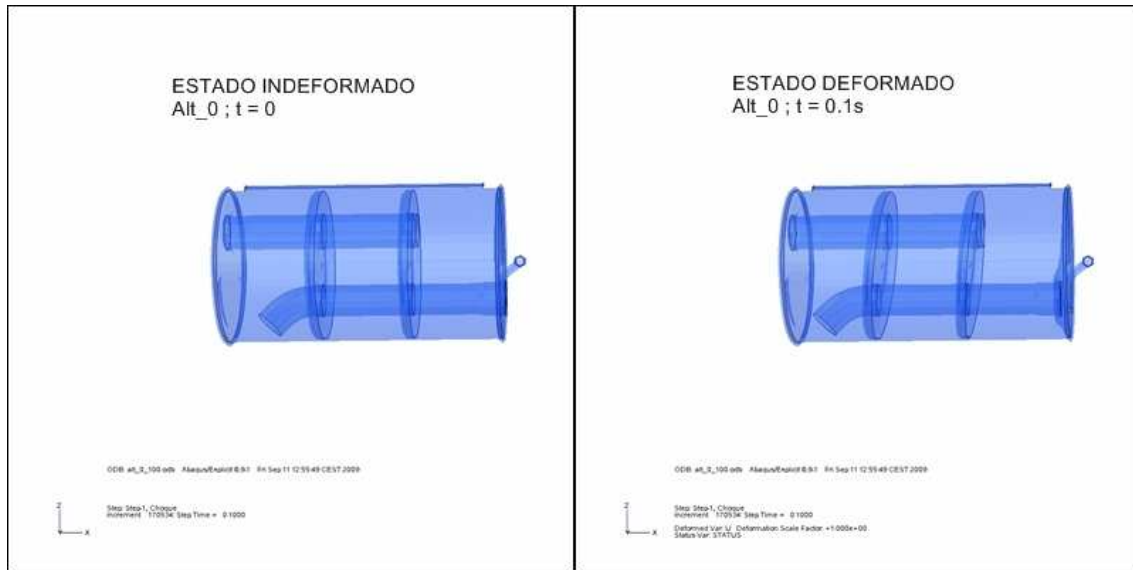


Fig 6.21 Alternativa 0: estados inicial y final de la marmita

De esta manera se logra que la deformación sufrida por la marmita sea mucho menor que la experimentada por el sistema base, aunque sigue debiendo limitarse aún más el desplazamiento de los baffles, que puede originar problemas acústicos notorios. En el punto de referencia anterior se registran estos datos:

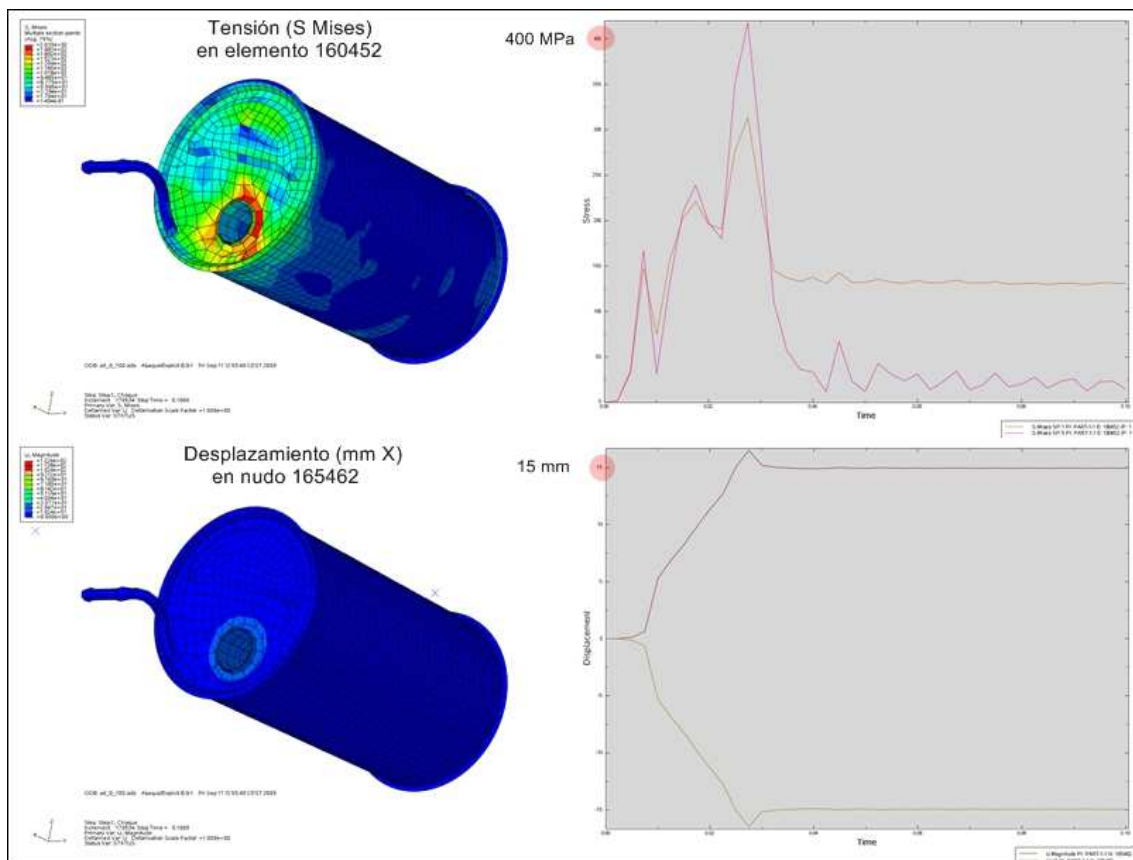


Fig 6.22 Alternativa 0: tensión y desplazamiento en punto de referencia

La tensión en el elemento seleccionado alcanza valores superiores a 400 MPa y desplazamientos ligeramente mayores que 15mm, lo cual representa efectivamente una sustancial mejora respecto del tubo original.

Alternativa 1

La primera alternativa entrega unos resultados bastante discretos, con un gráfico de energías más parecido al del tubo original que al anterior:

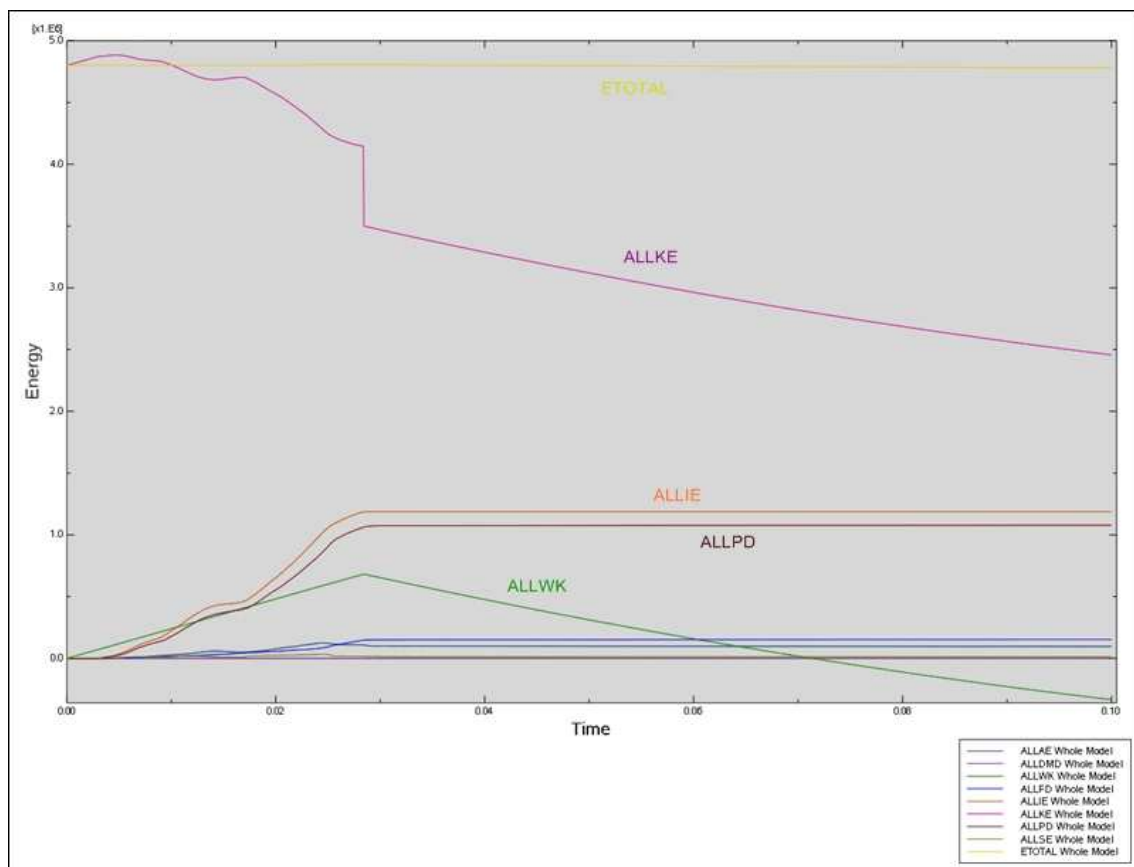


Fig 6.23 Alternativa 1: balance de energía. Ordenadas [kJ], Abscisas [s]

Gran parte de la energía cinética se transforma en energía interna de deformación no recuperable, esto es, tiene lugar una gran deformación plástica:

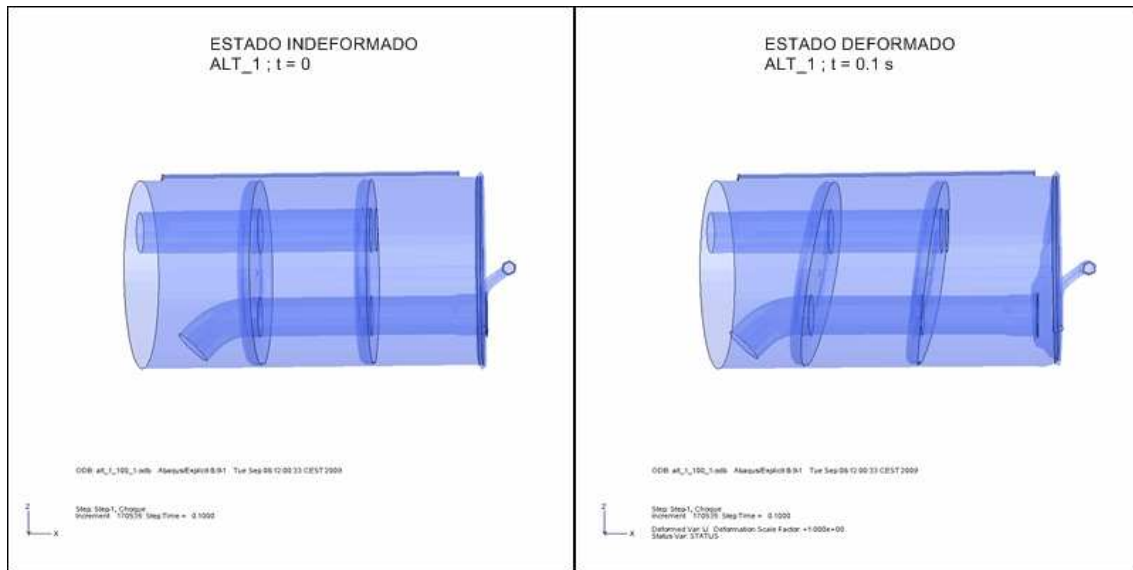


Fig 6.24 Alternativa 1: estados inicial y final de la marmita

Aunque menor que el sufrido por la marmita del sistema base, el daño en la marmita es excesivo, como también reflejan los valores de tensión y deformación registrados:

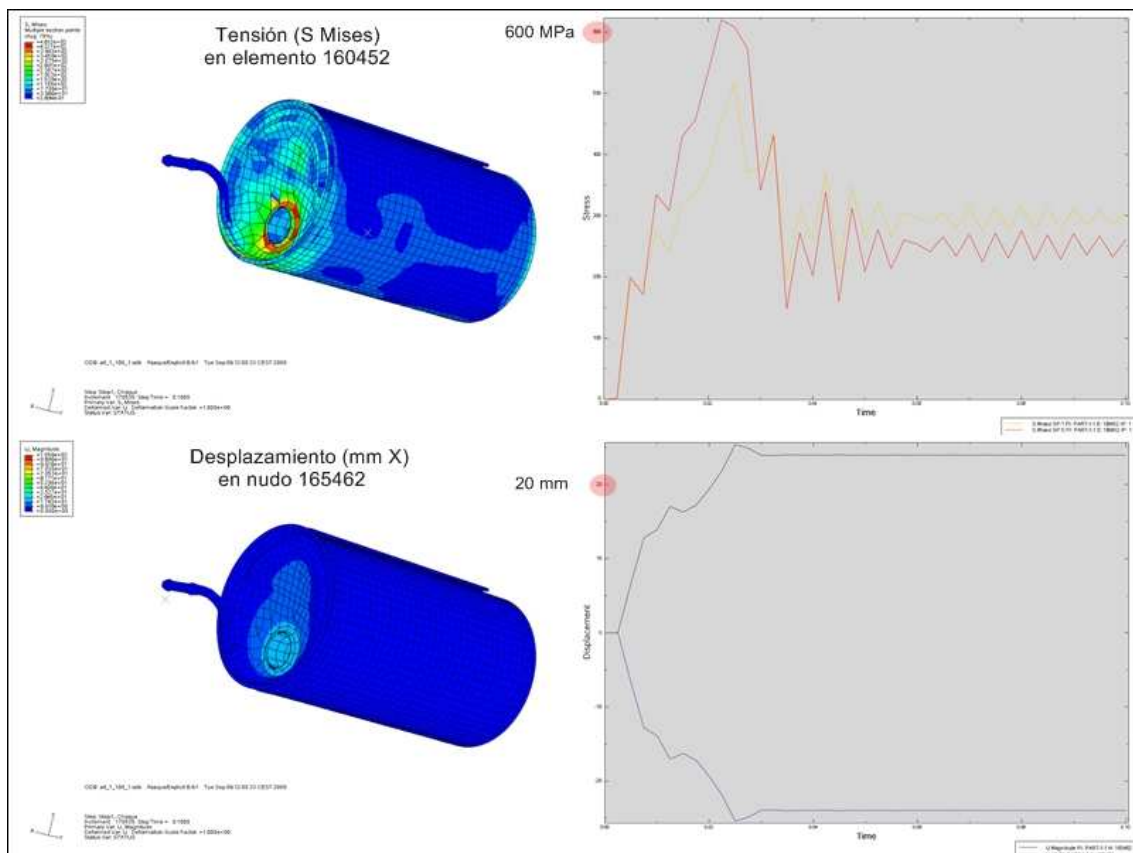


Fig 6.25 Alternativa 1: tensión y desplazamiento en punto de referencia

La tensión se eleva por encima de los 600 Mpa mientras que el desplazamiento en ese punto prácticamente se fija en 30mm. Sin embargo, la visualización de la secuencia del impacto permite aprender acerca del comportamiento particular de la unión entre el tubo interior y el exterior, pudiendo apreciarse cómo las pestañas se doblan sobre si mismas.

Así, el objetivo pasa a ser encontrar unos valores para las dimensiones de las pestañas que les doten de la esbeltez suficiente como para minimizar la resistencia en la unión y por tanto la transmisión de esfuerzos al tubo interior y la marmita, sin perder por completo su rigidez.

Las dimensiones de las pestañas son inicialmente de 32.5 mm de longitud por 20 mm de anchura. Se preparan y simulan tres nuevos modelos con una anchura reducida a 10 mm y longitudes respectivas de 32.5, 42.5 y 52.5 mm, que es la máxima posible sin modificar las dimensiones de los tubos.

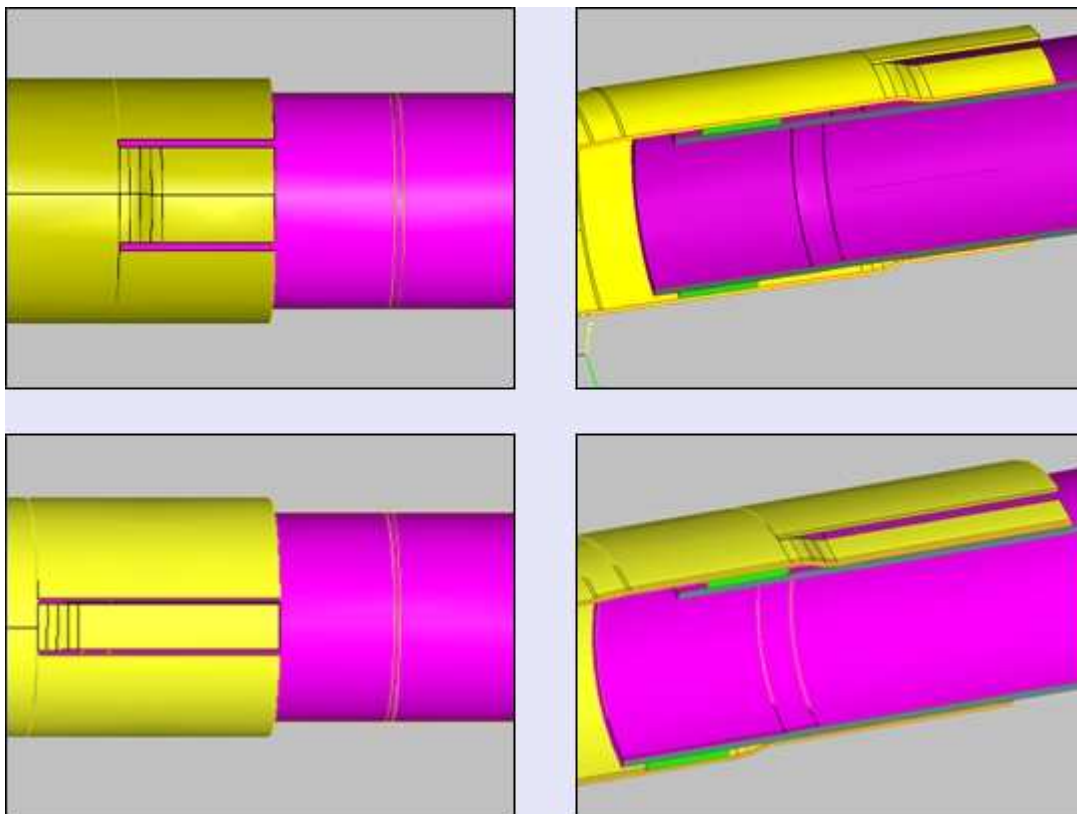


Fig 6.26 Comparativa entre Alternativa_1 (arriba) y Alternativa_1_52 (abajo)

En este caso el patrón de variación de la energía es muy diferente al inicial, asemejándose mas al arrojado por la Alternativa 0:

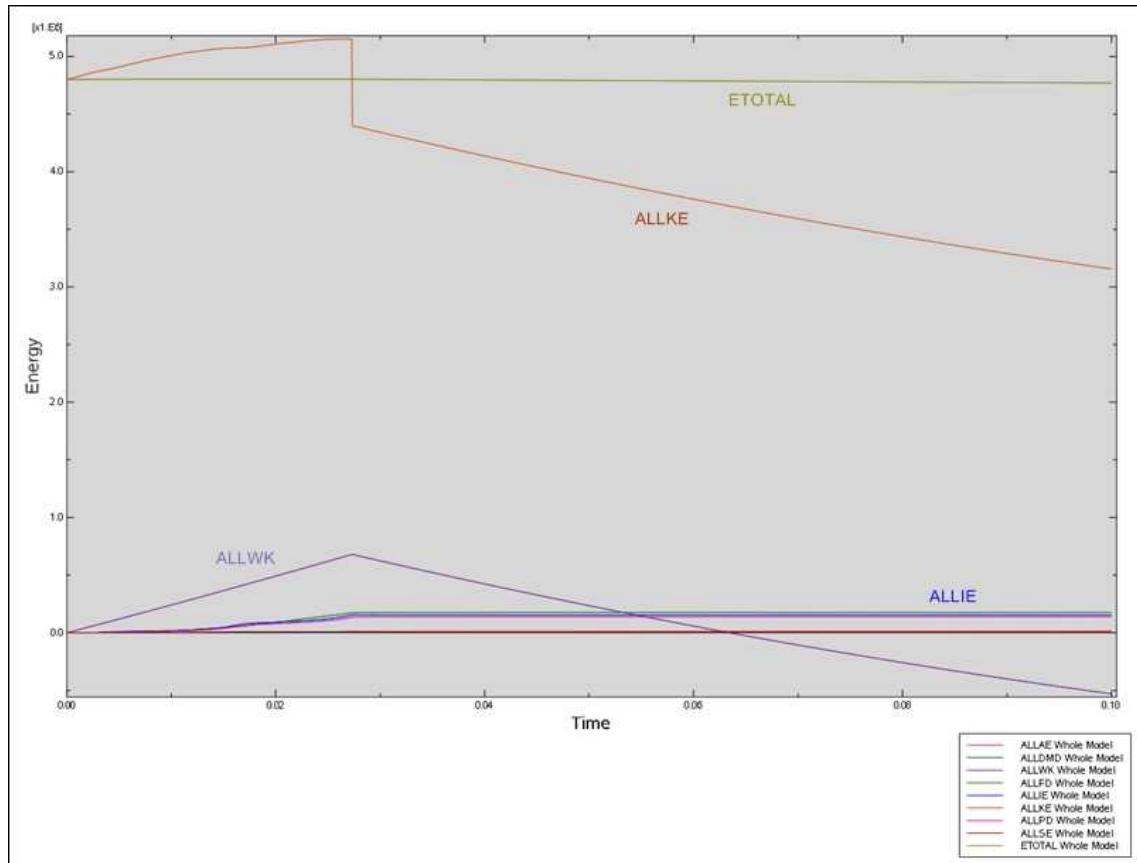


Fig 6.27 Alternativa 1_52: balance de energía. Ordenadas [kJ], Abscisas [s]

La energía interna alcanza valores mínimos y en este caso tampoco hay gran disipación por fricción, convirtiéndose el trabajo externo en aumento de la energía cinética hasta el instante del impacto con los topes. Prácticamente no existe deformación excepto la localizada en las propias pestañas de unión:

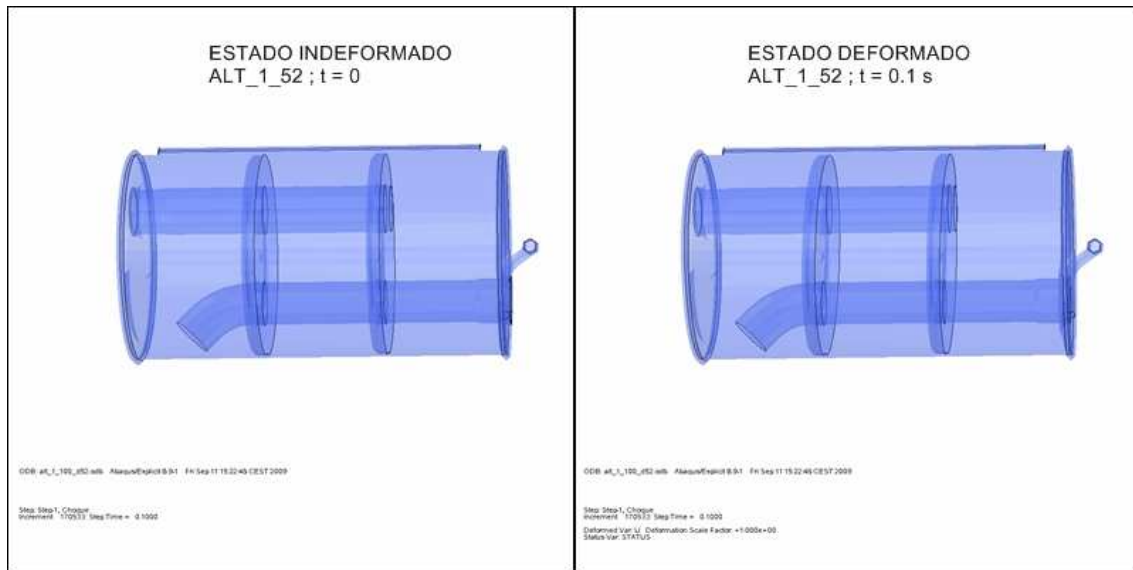


Fig 6.28 Alternativa 1_52: estados inicial y final de la marmita

Los valores registrados de tensión y desplazamiento en X confirman esto último, siendo las tensiones máximas menores que 200 Mpa y el desplazamiento en la boca de salida de la marmita de 5 mm.

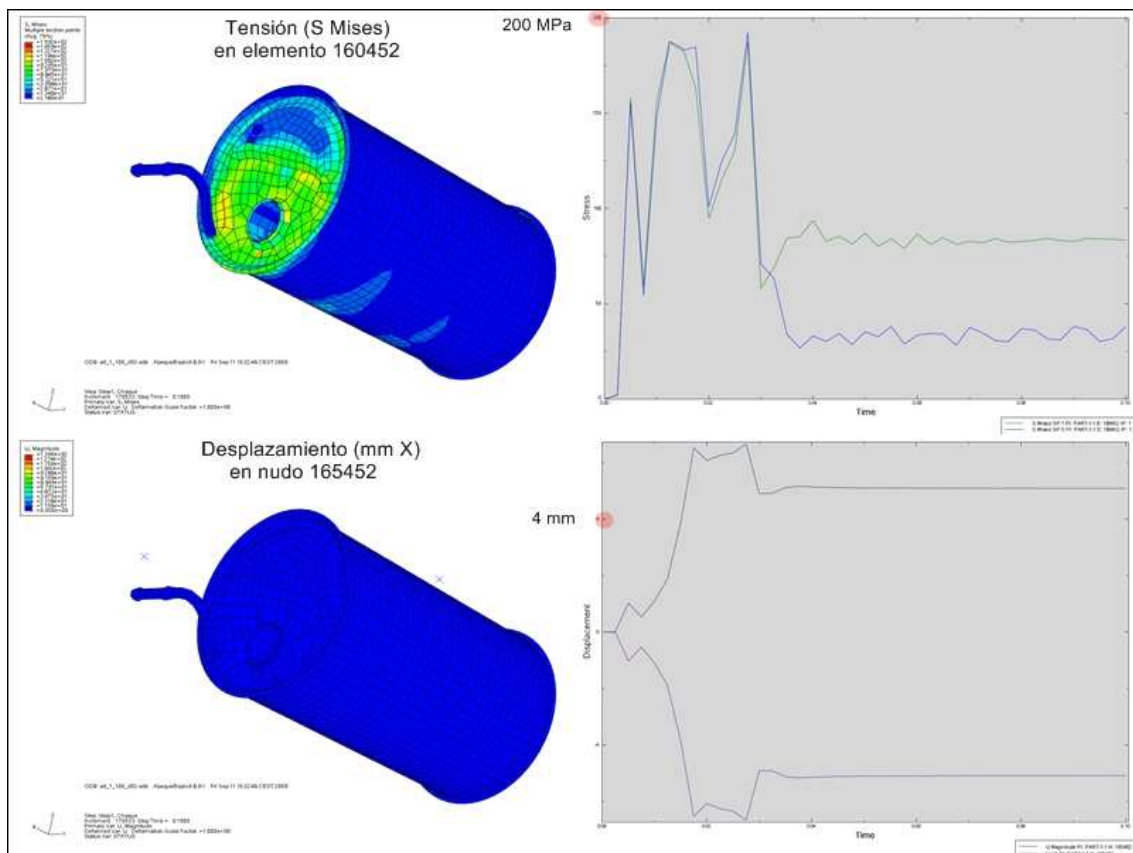


Fig 6.29 Alternativa 1_52: tensión y desplazamiento en punto de referencia

Alternativa 2

Al analizar el último diseño se sigue el mismo procedimiento que con el anterior, simulando varias versiones con diferentes dimensiones de las pestañas de unión. Sin embargo el mejor resultado corresponde al modelo inicial de Alternativa 2:

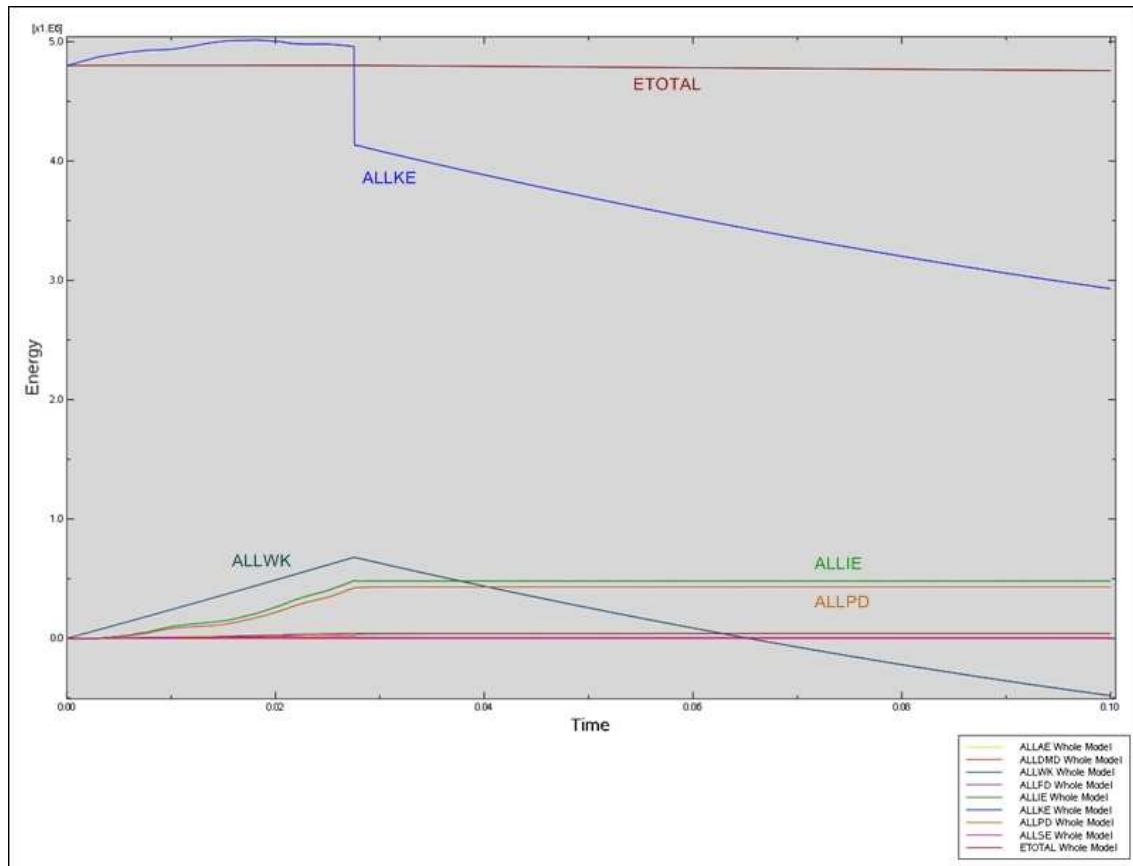


Fig 6.30 Alternativa 2: balance de energía. Ordenadas [kJ], Abscisas [s]

El gráfico de energías es similar pero se puede apreciar un mayor incremento de la energía interna, fundamentalmente de deformación plástica. La marmita se ve algo más dañada en este caso

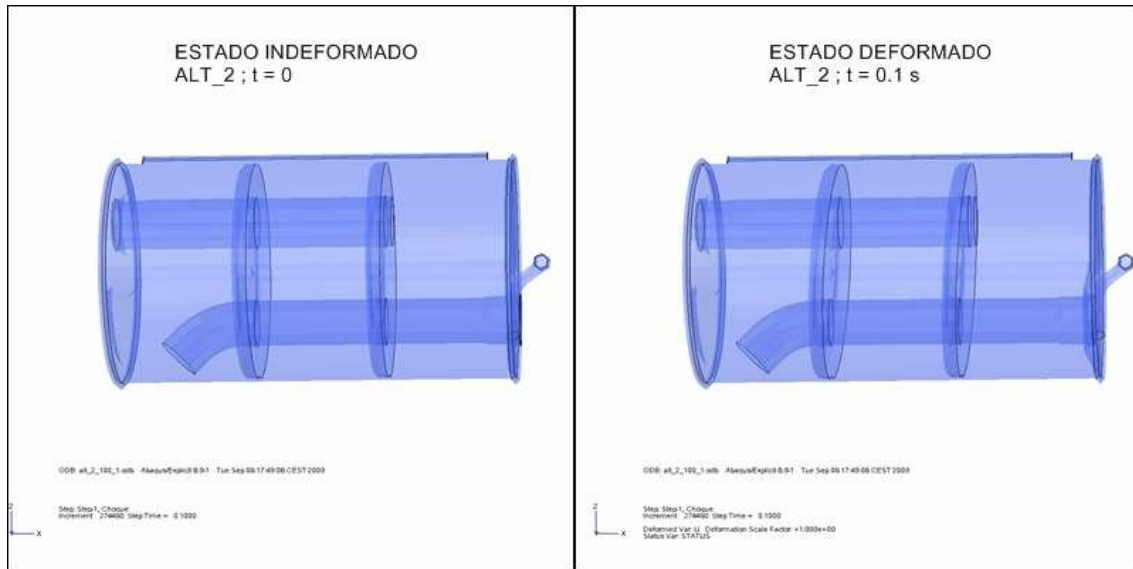


Fig 6.31 Alternativa 2: estados inicial y final de la marmita

Así, la máxima tensión obtenida en el elemento 160452 supera los 200 Mpa, y el desplazamiento longitudinal prácticamente alcanza los 10 mm.

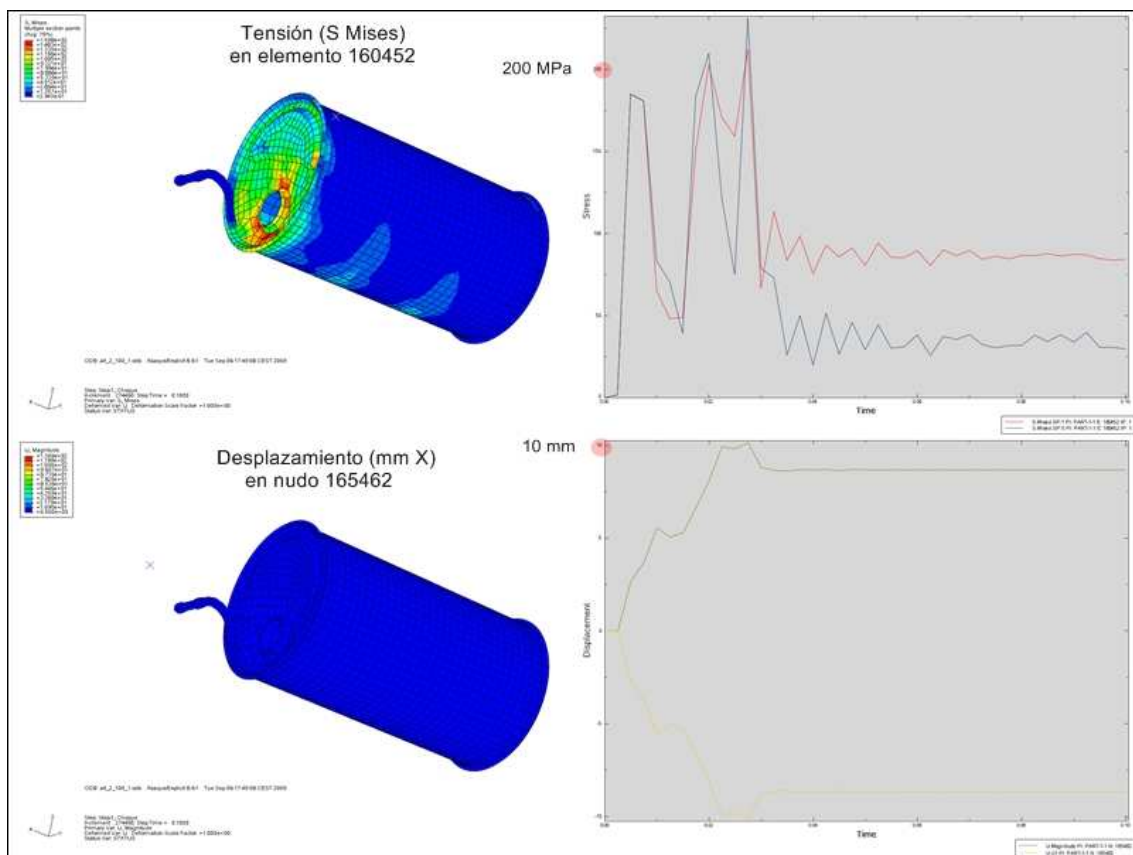


Fig 6.32 Alternativa 2: tensión y deformación en punto de referencia

Como puede comprobarse, los resultados más satisfactorios se alcanzan con la Alternativa 1, tras modificar las dimensiones originales de las pestañas de unión.



6.4 CONCLUSIONES

Se ha realizado la simulación de la respuesta ante el impacto del tubo de cola original, así como de la propuesta del cliente y las dos alternativas de diseño planteadas por la empresa.

El objetivo es analizar, para cada diseño, cómo se disipa la energía del impacto, determinando cuál de todos ellos es el más adecuado para evitar la transmisión de esfuerzos al silencioso. Se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El modelo más adecuado se consigue representando los anillos de malla mediante elementos rígidos unidos por elementos conectores al tubo interior.
- La propuesta del cliente (Alternativa_0) reduce de manera efectiva la energía interna de deformación respecto al tubo original, aumentando la disipación por fricción, pero los daños sufridos por la marmita continúan siendo excesivos.
- De las dos alternativas planteadas, la primera (Alternativa_1) es la que muestra resultados más satisfactorios, con deformaciones prácticamente nulas en la marmita. Sin embargo para ello es necesario modificar las dimensiones de las pestañas de unión. De este modo prácticamente toda la deformación se localiza sobre las mismas, y la mayor parte de la energía del impacto es absorbida por los topes.

Así pues, se selecciona ésta para continuar con el desarrollo, cuya siguiente fase consistirá en la realización de ensayos que verifiquen estos resultados y la adecuación del diseño escogido a los requerimientos.



7. ENSAYO DE IMPACTO SOBRE TUBO DE COLA

Los resultados obtenidos en la simulación deben ser verificados mediante la realización de un ensayo experimental, puesto que tanto el método empleado como las simplificaciones introducidas pueden dar lugar a desviaciones importantes respecto del comportamiento real en servicio.

La realización de pruebas de impacto sobre sistemas de escape consiste en analizar el efecto del choque de un muro incidente con unos valores de masa y velocidad determinados. En este caso dichos valores son los siguientes:

- Masa: 600 Kg.
- Velocidad: 4 m/s

La dificultad de conseguir mover una masa tan grande a tal velocidad determina una configuración especial del ensayo. El desplazamiento de la masa será vertical para aprovechar la acción de la gravedad, dejándola caer desde cierta altura de manera que la velocidad en el instante del impacto sea la establecida. Este método ha sido empleado anteriormente con resultados satisfactorios.

7.1 EQUIPO DE ENSAYO, DISPOSICIÓN Y MUESTRAS

El muro incidente se deja caer sobre la muestra, situada en posición vertical y fijada por la parte inferior a la bancada de ensayo. El desplazamiento máximo del muro se limita mediante dos topes que imitan la acción del chasis del vehículo durante el impacto. A continuación se realiza una descripción de todos los elementos empleados y su disposición:



Fig 7.1 Disposición del equipo de ensayo

1. Muro incidente

Para conseguir que la masa se desplace verticalmente hasta la muestra a ensayar se emplea un dispositivo que consiste en una placa plana y rectangular sobre la cual reposan discos metálicos extraíbles que permiten variar el peso. Sobre los discos se encuentra un perfil metálico con argollas de sujeción que permiten elevarlo mediante un polipasto, y en las cuatro esquinas se sueldan sendos perfiles que contienen guías de rodillos, cuya misión es la de minimizar el rozamiento durante la caída. El peso total de la estructura del carro junto con los discos es de 600 Kg.



Fig 7.2 Argollas de sujeción del carro y discos



Fig 7.3 Guías de rodillos

2. Bancada y pilares de sujeción

El carro que impactará sobre las muestras está contenido entre cuatro pilares fijados a la bancada sobre los cuales reposan las guías de rodillos, para limitar el desplazamiento al eje vertical. Se emplean además cuatro tirantes atornillados a los pilares para aumentar la rigidez de la estructura. El carro se eleva hasta la altura deseada empleando un polipasto.



Fig 7.4 Tirantes sobre los pilares

3. Topes del desplazamiento

Como se ha comentado, es necesario limitar la distancia máxima de caída del carro para, al igual que en la simulación, imitar la acción del chasis del vehículo en el impacto, que detendrá el avance del objeto incidente. Para ello se emplean dos topes formados por perfiles H 200 x 200 mm y espesor 10 mm. Están soldados en la parte inferior a una placa que permite atornillarlos a la bancada.



Fig 7.5 Fijación de tope a la bancada

En la parte superior va soldada otra placa cuadrada del mismo espesor, y sobre esta se pega un trozo de neopreno, cuya función es silenciar en la medida de lo posible el ruido del impacto.

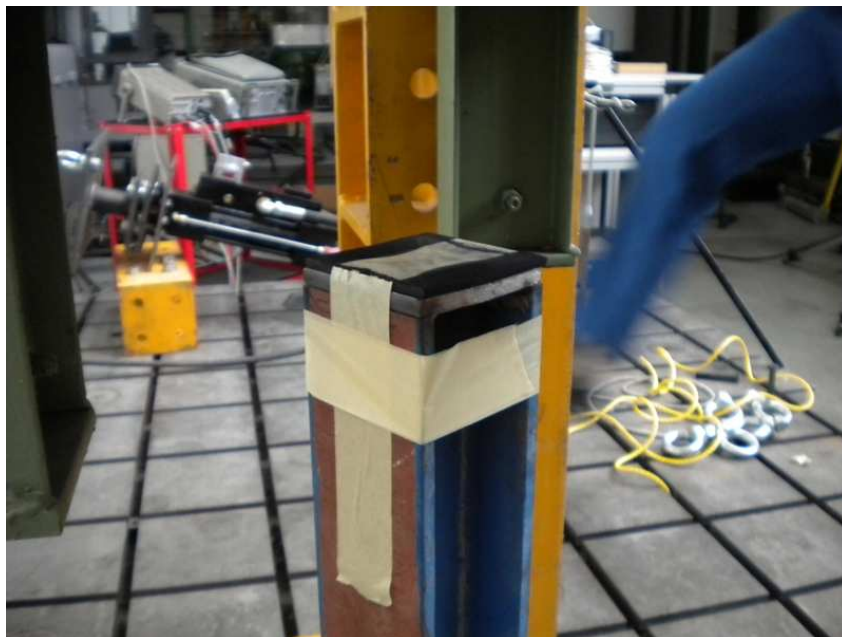


Fig 7.6 Banda de neopreno sobre tope

4. Placa para fijación de muestras

Las piezas sometidas a ensayo se colocan en posición vertical, con el tubo de cola hacia arriba. Para representar el empotramiento, y permitir al mismo tiempo una sustitución fácil tras cada prueba, las marmitas se sueldan a una placa fina, de 2 mm de espesor, que a su vez se atornilla a una placa más gruesa (doble, en este caso) atornillada a la bancada.



Fig 7.7 Placa para fijación de muestras



Fig 7.8 Muestra atornillada a la placa

Muestras empleadas

El ensayo se realiza para dos de los diseños probados en la simulación. El primero es el diseño original del sistema de referencia, que consiste en un único tubo recto a la salida de la marmita. Se denomina Cola_Std.



Fig 7.9 Muestra de Cola_Std

El segundo es el correspondiente a la primera alternativa de Emcon, con la modificación en las pestañas de unión entre ambos tubos para hacerlas más esbeltas, que se denomina Cola_alt1_52.



Fig 7.10 Muestra de Cola_alt1_52

En total se emplean cuatro muestras, dos para cada diseño. Todas han sido confeccionadas en el taller de prototipos, de manera artesanal, de modo que cabe esperar ciertas diferencias en los resultados.

7.2 DESARROLLO DEL ENSAYO

Una vez dispuesto el equipo, el desarrollo del ensayo es sencillo. En primer lugar, se marcan las cuatro muestras: por un lado se indica el número de muestra y por otro se señala el punto donde se va a medir la deformación mediante el desplazamiento de la boca de salida de la marmita, que corresponde aproximadamente a la posición del nudo 165462 de la simulación. Esto permitirá realizar una comparación numérica entre los resultados otorgados por ésta y por el posterior ensayo.



Fig 7.11 Marca para medir deformación

Se mide la distancia desde el borde superior de la marmita (329mm desde el suelo) hasta la marca en la boca de entrada. Como era de esperar, debido a la condición de prototipo de las piezas, y a la propia imprecisión de la medida, se obtienen valores algo dispares:

- Muestra nº 1, Cola_Std → Medida inicial: 9.65mm.
- Muestra nº 2, Cola_Std → Medida inicial: 9.4mm.
- Muestra nº 3, Cola_alt1_52 → Medida inicial: 9.7mm.
- Muestra nº 4, Cola_alt1_52 → Medida inicial: 10mm.

Para ensayar cada muestra, se eleva el carro con el polipasto hasta una altura que permita colocarla y atornillarla sobre la placa fija a la bancada. Se sitúan sendos tacos sobre los topes y se deja reposar la masa sobre los mismos para evitar trabajar en tensión.



Fig 7.12 Colocación de la primera muestra

Una vez fijada la muestra se eleva el carro hasta la altura requerida para la prueba. En este caso, la velocidad en el instante del impacto debe ser de 4m/s, de manera que dicha altura ha de ser de 82cm sobre el tubo de cola.

Para poder soltar el peso de forma rápida, se emplea una cuerda atada al gancho del polipasto y a su vez a otra colocada entre las argollas del carro. Está homologada para soportar 950kg de carga. Para soltar el carro, se corta la cuerda y éste cae hasta impactar primero con el tubo de cola y después con los topes.



Fig 7.13 Secuencia del impacto, muestra nº 1

Este proceso se repite para cada una de las cuatro muestras. Tras el impacto, se mide de nuevo la distancia entre el borde superior de la marmita y la boca de salida en el punto marcado, obteniendo los siguientes valores:

- Muestra nº 1, Cola_Std → Medida final: 48mm
- Muestra nº 2, Cola_Std → Medida final: 50.4mm
- Muestra nº 3, Cola_alt1_52 → Medida final: 10.2mm
- Muestra nº 4, Cola_alt1_52 → Medida final: 10.8mm

Como puede comprobarse, las diferencias con las medidas iniciales son mucho mayores en el caso de las dos primeras muestras, correspondientes al sistema de referencia. A continuación se realiza el análisis de los resultados obtenidos.

7.3 RESULTADOS OBTENIDOS

Cola_Std

Las dos primeras muestras, correspondientes al tubo de cola original, presentan grandes deformaciones en la marmita. Comparando las distancias medidas antes y

después del impacto podemos deducir el desplazamiento que ha sufrido dicho punto en cada caso:

- Muestra nº 1, Cola_Std $\rightarrow 48-9.65 = 38.35\text{mm}$.
- Muestra nº 2, Cola_Std $\rightarrow 50.4-9.4 = 41\text{mm}$.

En la simulación se obtuvieron desplazamientos de hasta 55mm en el eje X. Así pues, los valores obtenidos en el ensayo son algo menores pero de la misma magnitud, y en cualquier caso, muy elevados, lo cual se traduce en el hundimiento de la tapa trasera de la marmita hacia el interior.

El estado de ambas piezas tras el ensayo es el siguiente:



Fig 7.14 Muestras nº 1(izda) y nº 2 (dcha) tras el ensayo

Puede comprobarse cómo en ambas la deformación del tubo de cola es pequeña, localizada en la parte posterior, en el punto de contacto con el muro. En ambos casos el tubo ejerce presión sobre la marmita deformando la tapa trasera hacia el interior, pero se hace evidente la diferencia entre una y otra.

La muestra nº 2 muestra una deformación mucho más parecida a la prevista mediante el modelo de elementos finitos:

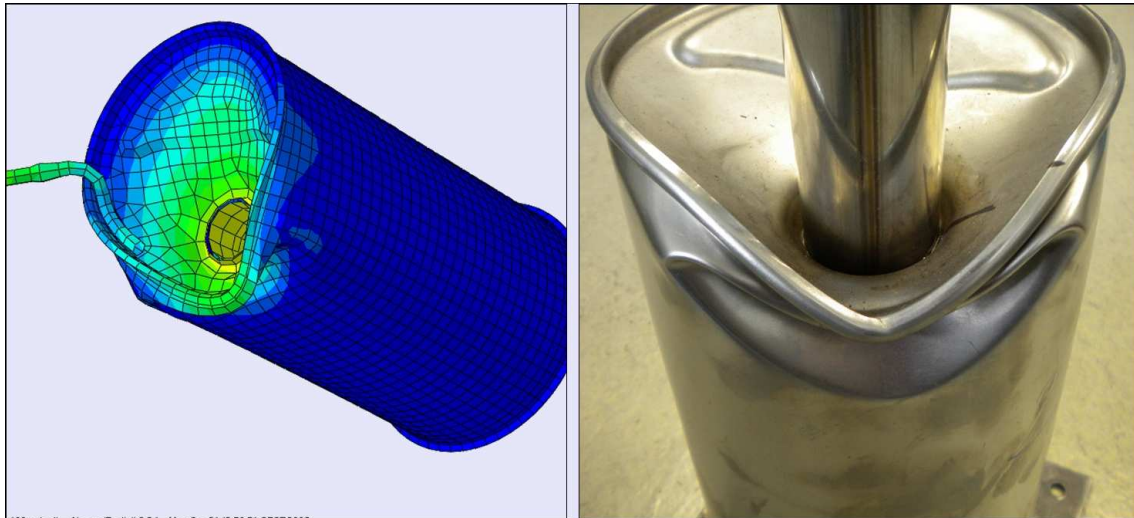


Fig 7.15 Deformación prevista (izda) y real (dcha) en la muestra n° 2

Esta variación en el resultado puede deberse a pequeñas diferencias en la fabricación de ambas muestras. Para determinar el motivo, así como para realizar un análisis más exhaustivo, se procede a abrir las marmitas e inspeccionar sus componentes internos:



Fig 7.16 Componentes internos de muestra n° 1 tras ensayo



Fig 7.17 Componentes internos de muestra n° 2 tras ensayo

En ambos casos los componentes internos de la marmita quedan gravemente afectados, inutilizándola por completo. El tubo de cola penetra rompiendo la soldadura de la boca y el tubo interior trasero empuja las tapas interiores e incluso hace contacto con la tapa delantera, contra la cual se aplasta. Las tapas interiores actúan a su vez sobre el tubo interior delantero y acaban fallando por la zona de la soldadura, rompiéndose a través del perforado.



Fig 7.18 Rotura de las tapas interiores

Puede observarse una diferencia entre ambas muestras en la zona de salida de la marmita. En ambos casos la soldadura ha fallado, pero parece que esto ha sucedido antes en la muestra nº 1, de modo que un mayor tramo del tubo de salida logra penetrar en la marmita:

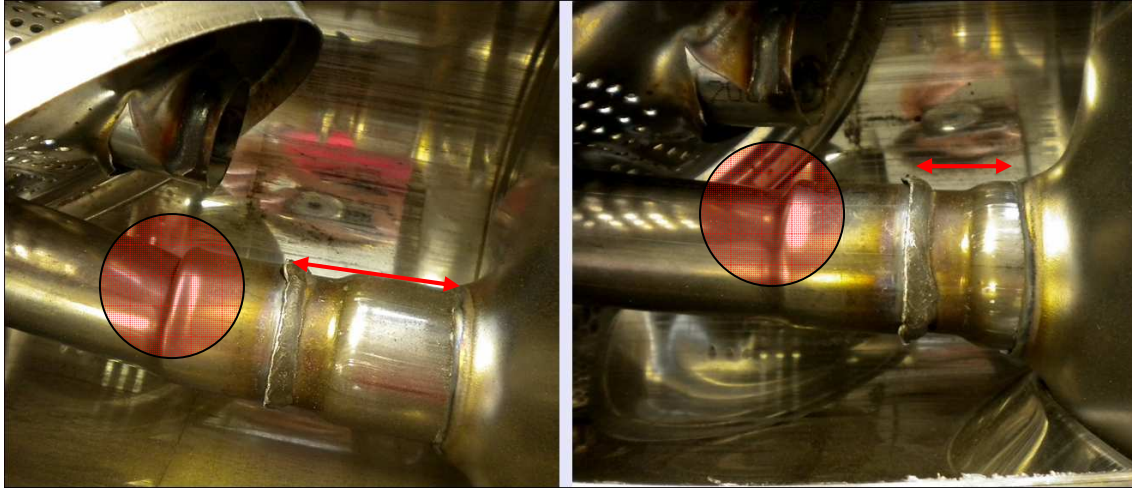


Fig 7.19 Penetración en la marmita, muestra nº 1 (izda) y muestra nº 2 (dcha)

El fallo prematuro de la soldadura en el caso de la primera muestra puede explicar la diferencia en las deformaciones sufridas por la tapa trasera y la envolvente. Además, puede observarse cómo en ese caso el pandeo del tubo interior trasero es significativamente mayor.

Cola_alt1_52

Para las dos muestras correspondientes al diseño del tubo de salida flexible, los desplazamientos en el punto marcado son mucho menores:

- Muestra nº 3, Cola_alt1_52 $\rightarrow 10.2-9.7 = 0.5\text{mm}$.
- Muestra nº 4, Cola_alt1_52 $\rightarrow 10.8-10 = 0.8\text{mm}$.

En este caso, el desplazamiento en el nudo correspondiente previsto por la simulación era de hasta 5mm, de manera que en el ensayo incluso se han superado las expectativas. Así pues, la marmita no sufre grandes deformaciones con este diseño, como puede apreciarse:



Fig 7.20 Muestras nº 3 (izda) y nº 4 (dcha) tras el ensayo

En ambos casos es imperceptible a simple vista la deformación que sufre la marmita, y se comportan de un modo muy similar. El tubo exterior ha deslizado sobre el interior y toda la deformación se localiza en las pestañas de unión entre ambos tubos. En ambos casos el punto de soldadura de una de las pestañas ha fallado.



Fig 7.21 Fallo de soldadura en pestaña, muestra n° 3 (izda) y muestra n° 4 (dcha)

Puesto que en la simulación se consideran todas las soldaduras como infinitamente rígidas, este es un efecto que no podía ser previsto y ha de ser tenido en consideración. Sin embargo, el resultado se aproxima en gran medida al arrojado por el cálculo:

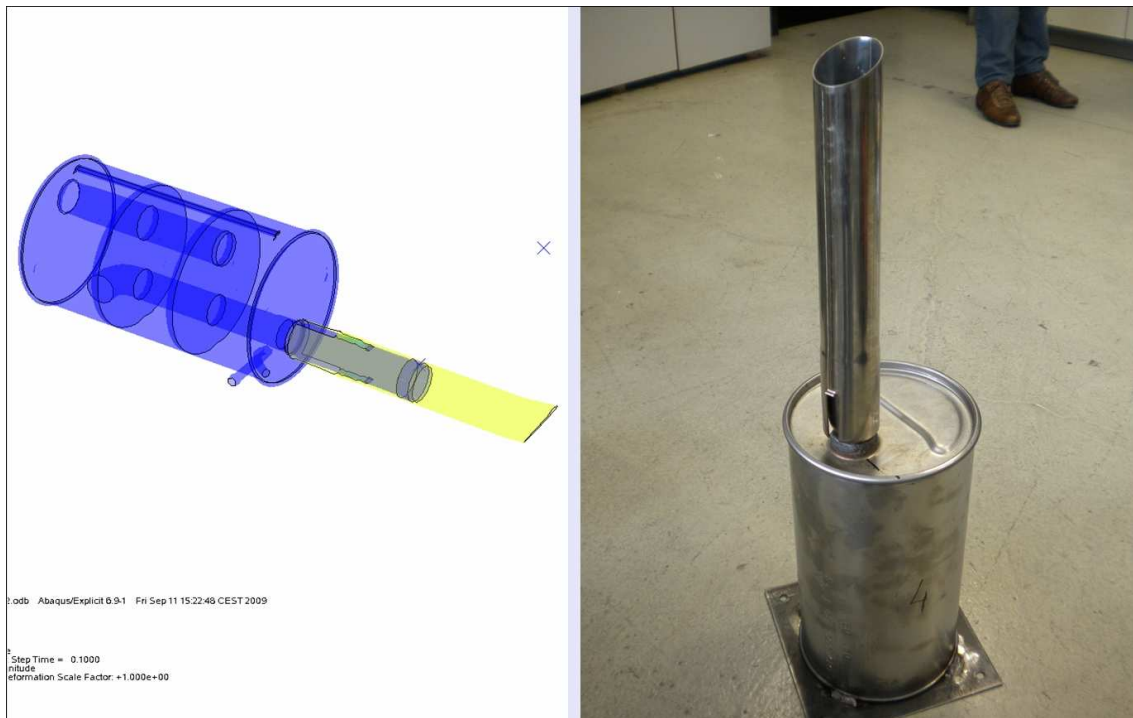


Fig 7.22 Deformación prevista (izda) y real (dcha, muestra n°3)

Al igual que con el tubo de salida original, se abren las marmitas para inspeccionar su interior tras el impacto:



Fig 7.23 Componentes internos de muestra n° 3 tras ensayo

Se comprueba que efectivamente la marmita no ha quedado dañada en su interior, y todos los componentes presentan un aspecto saludable. No se aprecian deformaciones notables que pudieran producir efectos acústicos indeseados o fallos de durabilidad.

7.4 CONCLUSIONES

Se ha realizado un ensayo de impacto sobre el tubo de cola, para el diseño original y la alternativa en desarrollo. Para ello se deja caer una masa de 600 Kg. sobre el sistema, de modo que la velocidad en el momento del impacto es de 4 m/s.

El objetivo es comparar los resultados con los obtenidos en la simulación, verificando que el modelo empleado es correcto, así como el buen comportamiento del diseño planteado:

- La simulación arroja resultados bastante similares a los obtenidos en el ensayo, de manera que puede considerarse un modelo adecuado para este tipo de cálculos.



- El diseño en desarrollo (Cola_alt_52) ofrece un buen comportamiento ante el impacto, minimizando la deformación y quedando ésta localizada en las pestañas, de modo que la marmita no sufre daños.
- El procedimiento de ensayo, experimental, se muestra adecuado. Las diferencias observadas en cada muestra provienen probablemente de pequeñas variaciones en la fabricación artesanal de los prototipos.
- Es conveniente estudiar con más detalle el comportamiento de la soldadura. En este caso se había modelado como infinitamente rígida y sin embargo en todas las muestras ha fallado en algún punto.



8. ENSAYO DE ACÚSTICA PARA RUIDO DE COLA

El sistema de escape es una de las más importantes fuentes de ruido en un automóvil, y la reducción del nivel sonoro emitido es, precisamente, una de las funciones principales del mismo.

El diseño del tubo de salida, como el de cualquier otro componente, puede afectar a las características acústicas del sistema en gran medida. Así pues, se considera necesario en este estudio la realización de un ensayo de acústica para determinar los posibles efectos introducidos por el diseño.

A continuación se explican brevemente algunos conceptos específicos de la acústica para un sistema de escape, así como la disposición, metodología y resultados del ensayo.

8.1 REQUISITOS ACÚSTICOS PARA UN SISTEMA DE ESCAPE

Los objetivos acústicos para un sistema determinado se establecen en base a los siguientes factores:

- Ruido de cola a plena carga (WOT) y en deceleración. Ruido global y tres primeros órdenes.
- Ruido radiado.
- Vibración del sistema de escape.
- Ruido en ralentí.
- Apreciación subjetiva del ruido.

Así pues, la contribución del sistema de escape al ruido global del vehículo puede subdividirse en tres fuentes diferentes: ruido radiado por las marmitas, vibraciones transmitidas al chasis a través de los elementos de sujeción, y ruido de cola.

El primero, emitido por las paredes de las marmitas, aumenta en las siguientes situaciones: existencia de grandes superficies planas, marmitas con envolventes formadas por una sola capa, grandes distancias entre “baffles” (tapas interiores) y perforaciones muy próximas a superficies planas.



El segundo consiste en grandes vibraciones en los soportes del sistema que introducen molestos temblores en la cabina a través del suelo de la misma. Para evitarlo es conveniente determinar los modos de vibración del sistema completo y así situar dichos soportes en puntos menos conflictivos, aunque en ocasiones es complicado debido a la geometría del chasis y el reducido espacio disponible en los bajos del vehículo. Una solución adecuada es emplear un elemento flexible más blando para desacoplar el colector de la parte fría.

En cualquier caso, el análisis de estos dos tipos de ruido queda fuera de este estudio puesto que el componente en desarrollo no tendrá ninguna incidencia sobre ellos.

El ruido del tubo de cola o TPN (Tail Pipe Noise), es el dominante y habitualmente centra la atención en el proceso de diseño. Para su análisis, puede ser representado mediante gráficos de ruido global (dBA) – velocidad del motor (RPM), ruido de órdenes (dB) – velocidad del motor (RPM) o espectro de frecuencias para un valor concreto de RPM.

El ruido de órdenes es debido a las resonancias inducidas en el escape por la excitación proveniente del funcionamiento característico del motor. Dependiendo del número de cilindros y su disposición -también de la presencia de elementos especiales como ejes de balanceo- el motor sufrirá vibraciones de diversos tipos que pueden clasificarse en función del número de sacudidas por cada vuelta del cigüeñal: orden 1 cuando suceden una vez por vuelta, orden 2 cuando suceden dos veces, y así sucesivamente. Concretamente, la secuencia de encendido determina el movimiento de los pistones y los pulsos de salida de gas hacia el colector generando dichas resonancias.

Para comprender, en cada motor, cuáles son los órdenes predominantes y dónde ocurren las resonancias, pueden emplearse mapas de color (colourmap) o gráficas de cascada (waterfall plot):

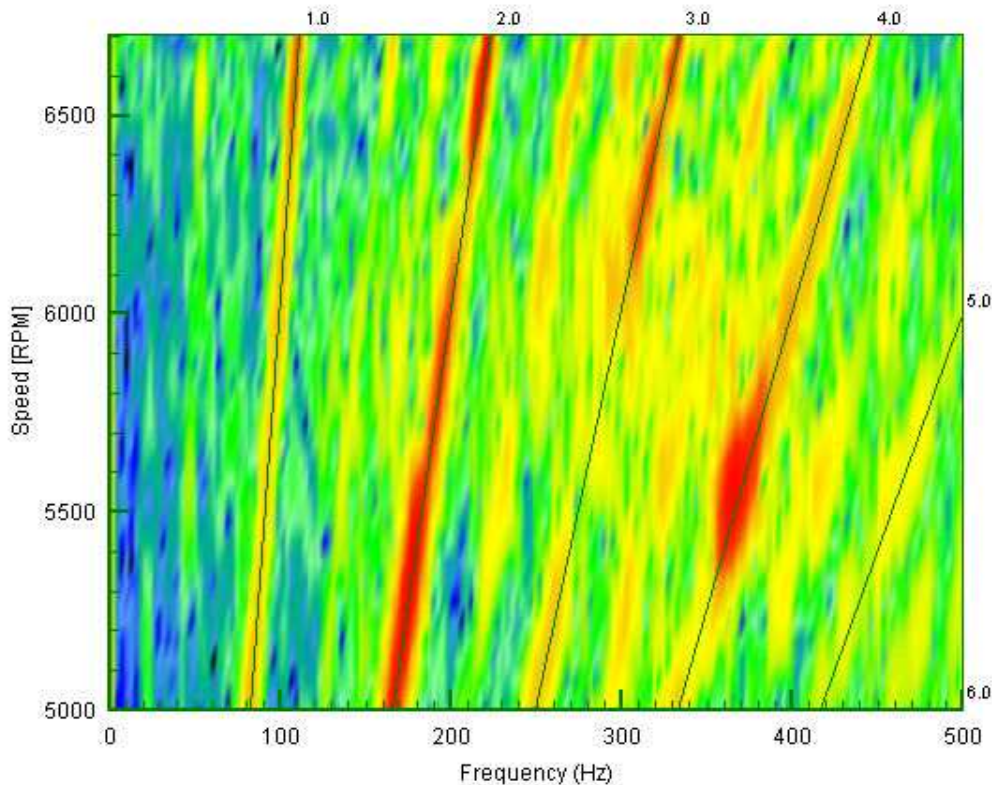


Fig 8.1 Gráfico de color para identificación de órdenes

En la imagen pueden identificarse las líneas correspondientes a diferentes órdenes, que pueden obtenerse como:

$$N^{\circ} \text{ Orden} = (60 \times \text{frecuencia}) / \text{RPM}$$

Los valores más altos para el nivel de ruido en la imagen tienen lugar para el orden 2 fundamentalmente, hecho habitual en los motores de cuatro cilindros en línea, por ejemplo. Este tipo de análisis puede otorgar valiosa información sobre el estado del motor, puesto que vibraciones de gran amplitud correspondientes a órdenes no habituales para una determinada configuración indicarán problemas concretos como fallos de encendido en un cilindro, dosado inadecuado, contrapesos del cigüeñal desequilibrados, etc.

En el ensayo descrito a continuación se analiza la influencia del diseño del tubo de cola para el TPN a plena carga y en deceleración, así como en la percepción subjetiva del ruido.

8.2 EQUIPO DE ENSAYO, DISPOSICIÓN Y MUESTRAS

Para la realización del ensayo, se sigue el procedimiento estándar de EMCON Technologies TPA-T-001 (revisión 3). El equipo utilizado es el siguiente:

Banco Dinamométrico

El procedimiento mencionado es válido para tests realizados sobre el automóvil con un banco de rodillos ó bien directamente sobre el motor. En este caso se realiza de la segunda manera, empleando el freno dinamométrico Borghi & Saveri FE 260-S y control de combustible AVL 730.

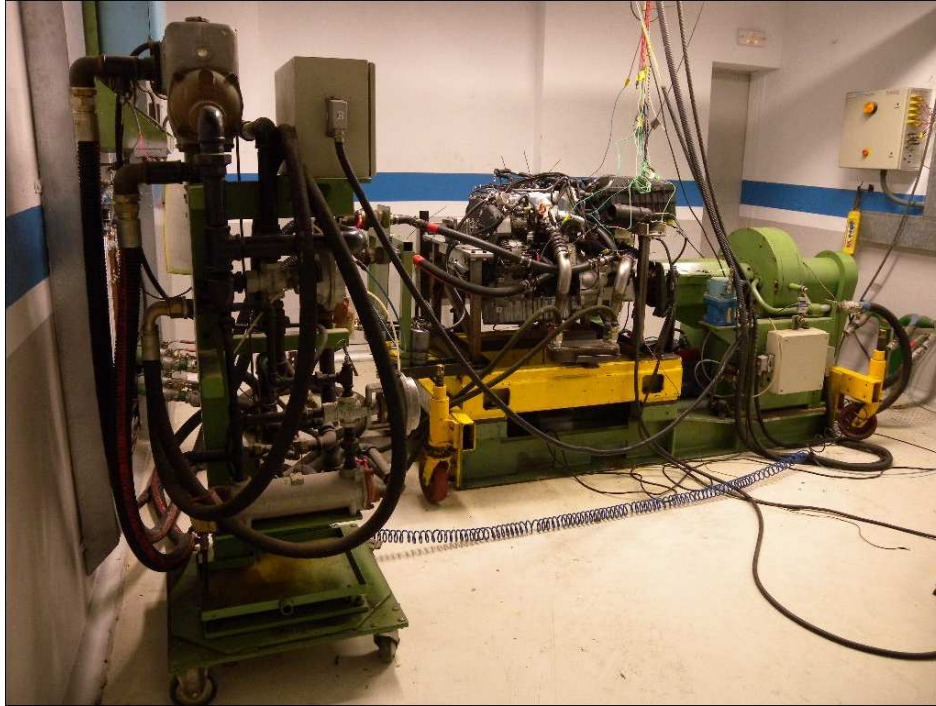


Fig 8.2 Sala de banco de motores

Tanto el freno como la carga se controlan mediante el equipo Ricardo Test Automation Series 2000 y el ordenador TaskMaster 300. Permiten establecer unas condiciones de par y/o velocidad determinadas así como monitorizar en todo momento el estado de la prueba mediante diversos valores de temperatura, presión, posición del acelerador, par y potencia.



Fig 8.3 Equipo de control del banco

Sistema de análisis

Se emplea el analizador Brüel & Kjaer Type 2145, que permite filtrar el sonido por octavas y órdenes, así como capturar durante las rampas de aceleración-deceleración mediante control de RPM.



Fig 8.4 Sistemas de análisis del ruido

Se establece el set-up del analizador para filtro de una octava (correspondiente a las frecuencias 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Hz) y órdenes 2, 4, 6 y 8. Tomará datos cada 50 RPM desde las 1000 hasta las 5200 en subida y bajada.

Micrófono

Para capturar el ruido de cola, se utiliza el micrófono Brüel & Kjaer Type 4189 acoplado al amplificador Type 2669. Es un micrófono omnidireccional con sensibilidad de 50 mV/Pa y un error del 5 % de 0.2 dB. Se coloca en la posición determinada por el procedimiento empleado, a 50 cm. del tubo de cola y formando 45 ° con el eje del mismo a la salida:

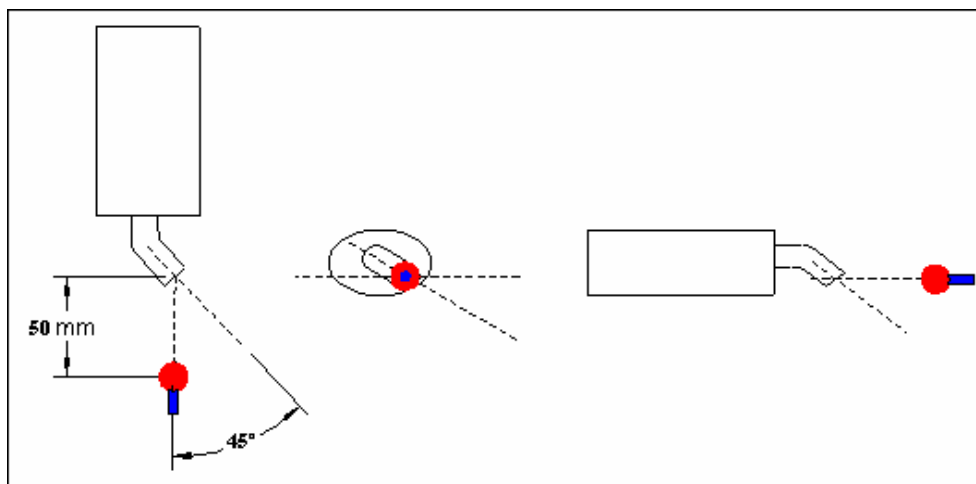


Fig 8.5 Croquis de colocación del micrófono

Además, para capturar el sonido en formato .WAV se emplea el micrófono Zoom Handy Recorder H4. Esto permite la posterior evaluación subjetiva y análisis visual mediante software especializado, como Adobe Audition 2.0.

Motor

Se dispone de un motor 1.6 CR TDI 77 kW para realizar el ensayo. No se trata de la motorización a la cual corresponde el sistema de referencia y por tanto los resultados pueden no ser totalmente representativos de la realidad. Sin embargo, de entre las opciones disponibles, se elige ésta por ser la de arquitectura –cuatro cilindros en línea– y cilindrada más parecidos.

Es previsible, por tratarse de un motor sobrealimentado, que el ruido de flujo generado por el gran caudal de gas sea muy grande y no se cumplan los objetivos acústicos del sistema base. Así pues, mediante este ensayo se pretende simplemente

comparar el ruido emitido con el tubo de cola original y el nuevo diseño, para descartar diferencias notables.

Muestras empleadas

El test se realiza para los dos diseños ya probados en el ensayo de impacto, Cola_Std y Cola_alt1_52.



Fig 8.6 Muestras: Cola_std (izda) y Cola_alt1_52 (dcha)

El colector es el correspondiente al motor 1,6 CR TDI, cuyo tubo intermedio tiene un diámetro de 50mm. Esto obliga a adaptar el tubo de entrada a la marmita mediante una sección de 150mm y diámetro 45mm insertada en el tubo intermedio y achicada a 38 mm en la boca de entrada. Además, se sueldan dos varillas al tubo intermedio y marmita en las posiciones correspondientes a otro sistema con marmita de 8l y tubo de cola recto.



Fig 8.7 *Detalle del doble estrechamiento en tubo intermedio*

Se coloca además una sonda de presión en el manguito de unión entre colector y silencioso, para controlar la contrapresión, y un termopar a la salida del tubo de cola, necesario para controlar la temperatura del gas, que determina el comienzo de la rampa de aceleración.

8.3 DESARROLLO DEL ENSAYO

En primer lugar, se comprueba la correcta disposición del banco y el motor: anclajes del bastidor y cigüeñal, tubos de presión del turbo, admisión, colector de escape, conexiones eléctricas, circuito de combustible y refrigeración.

A continuación se coloca el silencioso, realizando la unión al colector mediante un manguito de diámetro 50mm. Se fija en su posición mediante las varillas de sujeción y silentblocks, de manera que la parte final sobresale de la sala de ensayo hacia el exterior por una ventana a tal efecto. Esta ventana se ajusta para dejar únicamente el espacio necesario para la salida del tramo final, y posteriormente se agregan bloques de aislante acústico en la misma.



Fig 8.8 *Unión colector-silencioso y ventana de salida*

En el exterior, se sitúa el micrófono tal y como se ha descrito anteriormente, y se realiza la calibración, en función de la presión atmosférica del momento.



Fig 8.9 Colocación del micrófono en el exterior

Tras activar la bomba de combustible y los sistemas de ventilación de la sala, puede arrancarse el motor. La programación del sistema de control del banco es la siguiente:

- Standby: 2000 RPM/carga al 30%, duración de la fase ilimitada (salto manual)
- Calentamiento: subida en 60s a 3000 RPM/carga 70%. Temperaturas de mantenimiento 50° C para el agua y 80° C para el aceite. Fin de calentamiento cuando la temperatura de gas a la salida es de 350 ° C.
- Comienzo de rampas: bajada en 10s a 950 RPM/carga 100%, duración de la fase 12s.
- Rampa de aceleración: subida en 30s a 5300 RPM/carga 100%, duración de la fase 32s.
- Rampa de deceleración: bajada en 30s/0s a 950 RPM/carga 0%, duración 32s.



- Enfriamiento: subida a 1500 RPM/carga 15 % en 5s, duración ilimitada (salto manual)

En el analizador, se comprueba la señal del tacómetro, se abre un nuevo fichero y se activa el modo de control. Como se ha indicado, la grabación se realizará automáticamente durante las rampas, tomando datos cada 50 RPM. Una vez finalizadas debe finalizarse el fichero y comprobar que no han surgido problemas en la adquisición de los datos correspondientes al ruido global, ruido de órdenes y señal del tacómetro, así como la ausencia de puntos de saturación (overloads) que distorsionan la medida.

En total, para cada una de las dos muestras se realizan cuatro mediciones, consistentes cada una en dos rampas –subida y bajada– de modo que puede comprobarse la repetitividad del ensayo. Los datos recogidos por el analizador se pueden convertir a ficheros tipo ASCII para después trasladarlos a hojas de cálculo Excel que permiten visualizarlos cómodamente mediante tablas y gráficas.

8.4 RESULTADOS OBTENIDOS

Cola_std

Se realizan cuatro grabaciones que confirman la repetitividad de la prueba.

Tail Pipe	Cola_std	Cola_std	Cola_std	Cola_std
Fichero Ascii Subida	500	502	504	506
Fichero Ascii Bajada	501	503	505	507
Tª ruido de cola	350	350	350	350
Tª ambiente	22	22	22	22

Como se esperaba, los niveles de ruido son excesivos y superan con creces el límite objetivo, debido a que el sistema probado no es adecuado para el motor empleado en el ensayo. Concretamente, se superan los 105 dB para el ruido global en un amplio rango de revoluciones:

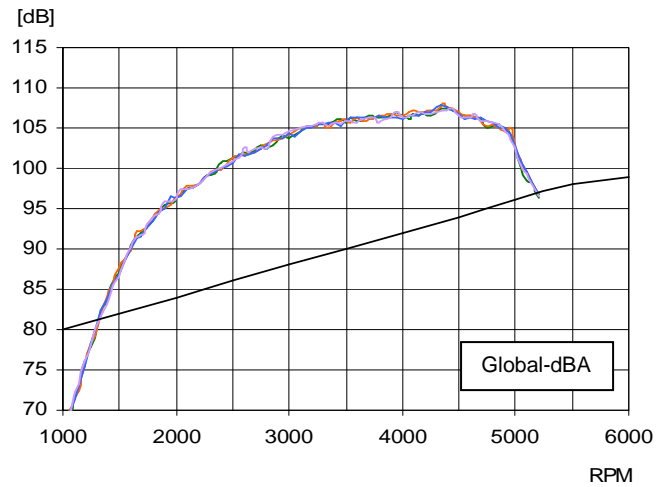
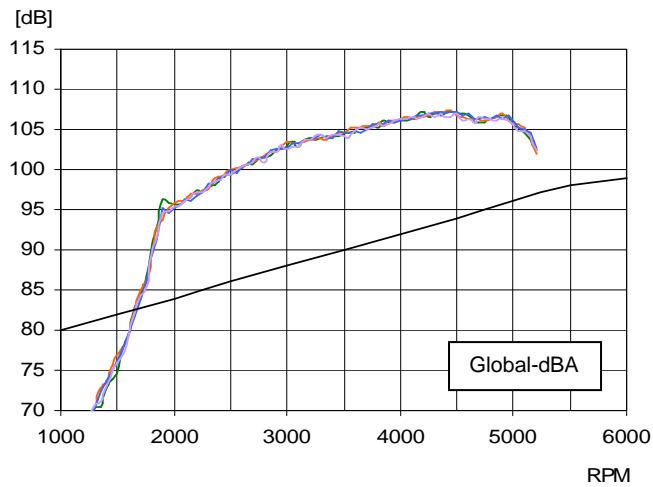


Fig 8.10 Cola_std: Ruido global. Subida (izda) y bajada (dcha)

Los niveles para las bajas frecuencias, así como para el orden 2, son muy bajos:

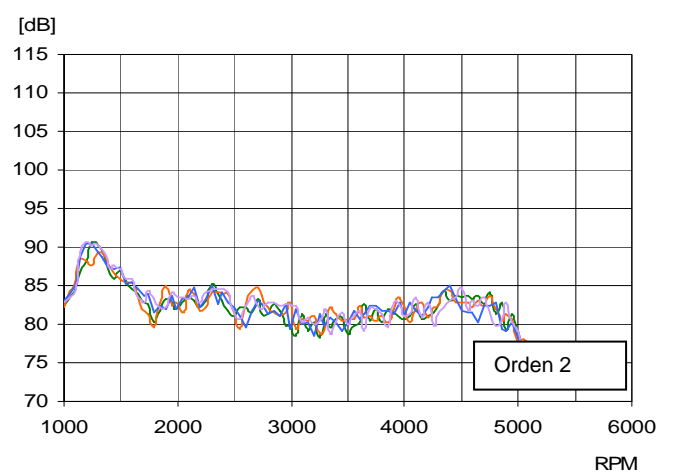
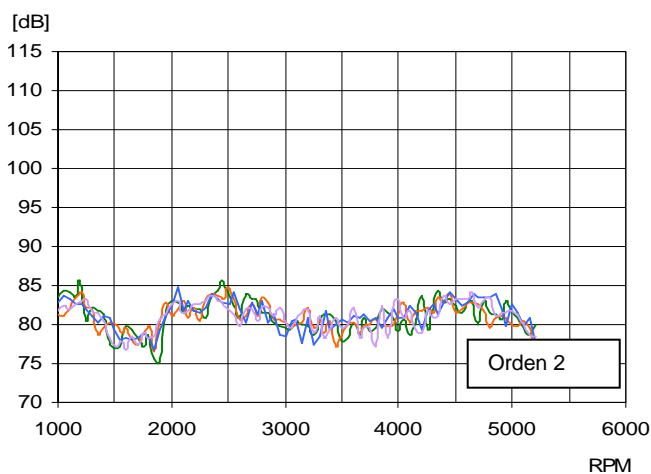
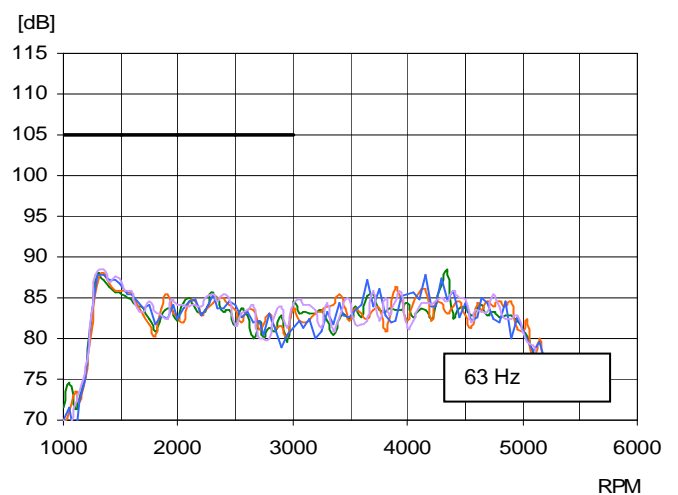
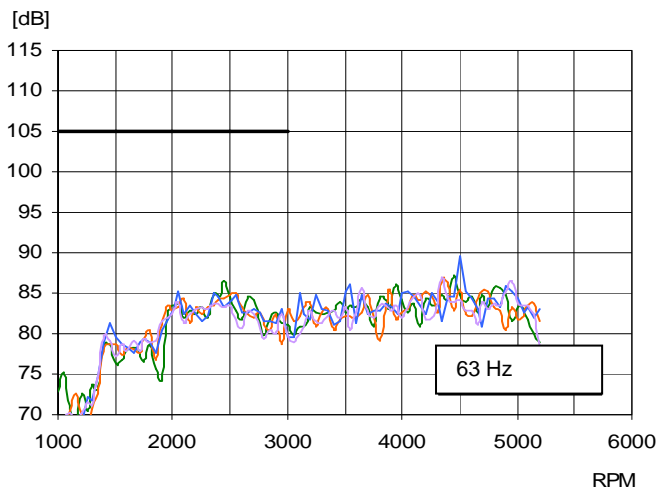


Fig 8.11 Cola_std: Octava de 63Hz y 2º Orden. Subida (izda) y bajada (dcha)

Así, la mayor contribución al ruido emitido por el tubo de cola viene de las altas frecuencias, esto es, el ruido de flujo previsto anteriormente:

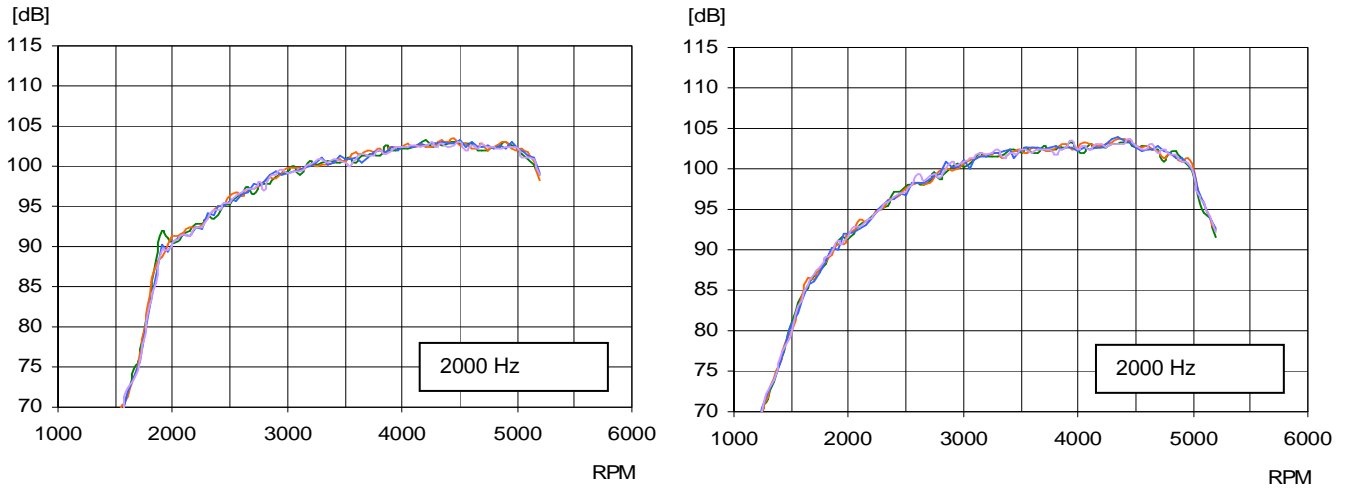


Fig 8.12 Cola_std: Octava de 2kHz. Subida (izda) y bajada (dcha)

Cola_alt1_52

Las cuatro grabaciones realizadas para la segunda muestra arrojan resultados similares, sin grandes cambios entre cada una y excesivo ruido global y de flujo:

Tail Pipe	Cola_alt1_52	Cola_alt1_52	Cola_alt1_52	Cola_alt1_52
Fichero Ascii Subida	508	510	512	514
Fichero Ascii Bajada	509	511	513	515
Tª ruido de cola	350	350	350	350
Tª ambiente	23	23	23	23

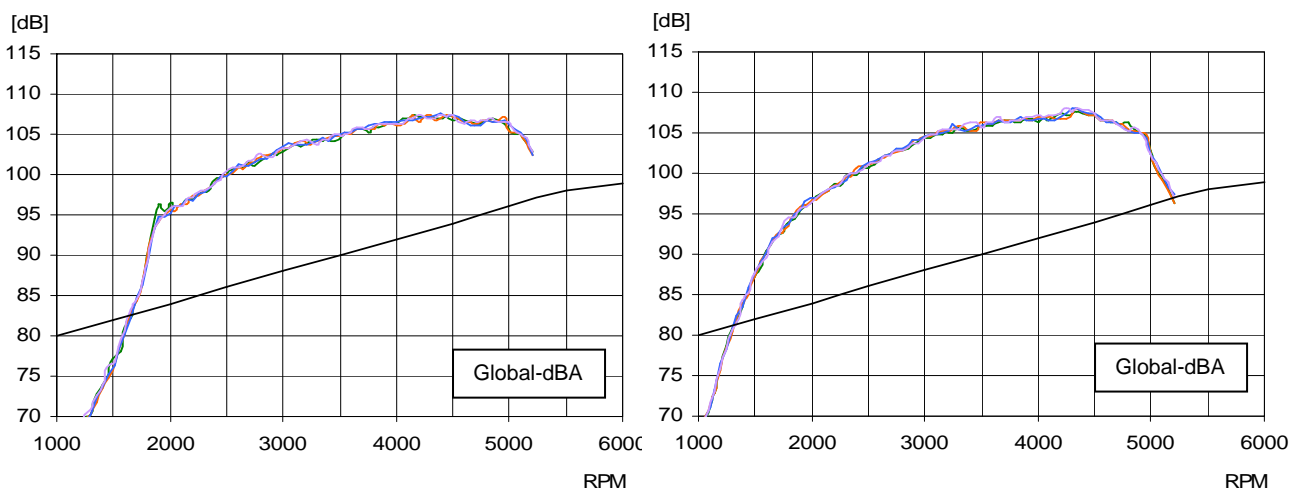


Fig 8.13 Cola_alt1_52: Ruido global. Subida (izda) y bajada (dcha)

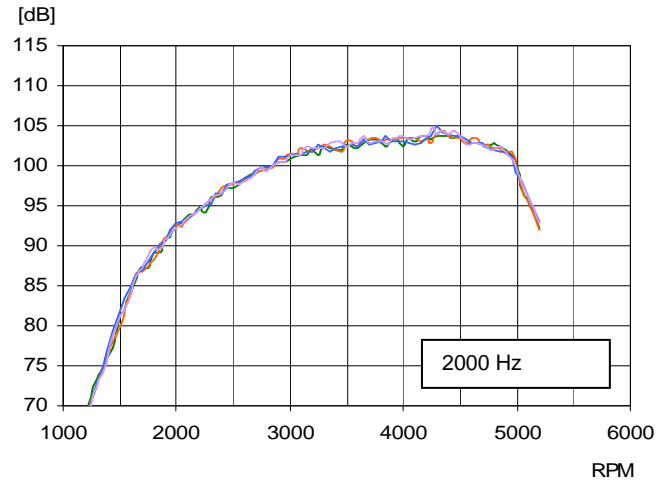
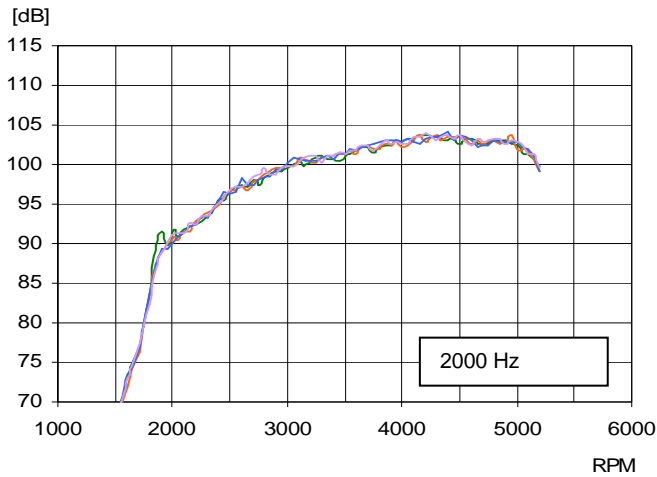


Fig 8.14 Cola_alt1_52: Octava de 2 kHz. Subida (izda) y bajada (dcha)

Comparativa

El verdadero propósito de esta prueba es comparar las mediciones realizadas para ambos tubos de cola para confirmar que el diseño del tubo flexible no introduce efectos acústicos notorios e indeseados. Para realizar esta comprobación, se superponen los valores recogidos para cada muestra en todas las octavas, ruido global y de orden.

Tail Pipe	Cola_std	Cola_std	Cola_alt1_52	Cola_alt1_52
Fichero Ascii Subida	500	502	508	510
Fichero Ascii Bajada	501	503	509	511
Tª ruido de cola	350	350	350	350
Tª ambiente	22	22	23	23

El ruido global, tanto en subida como en bajada, no muestra diferencias significativas entre los niveles para la Cola_std y Cola_alt1_52.

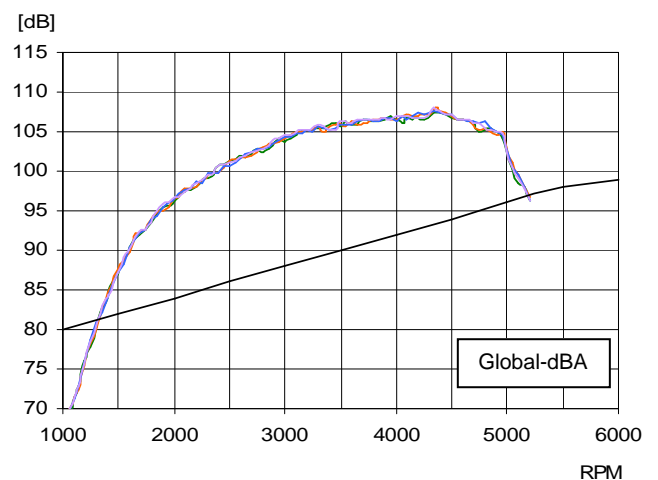
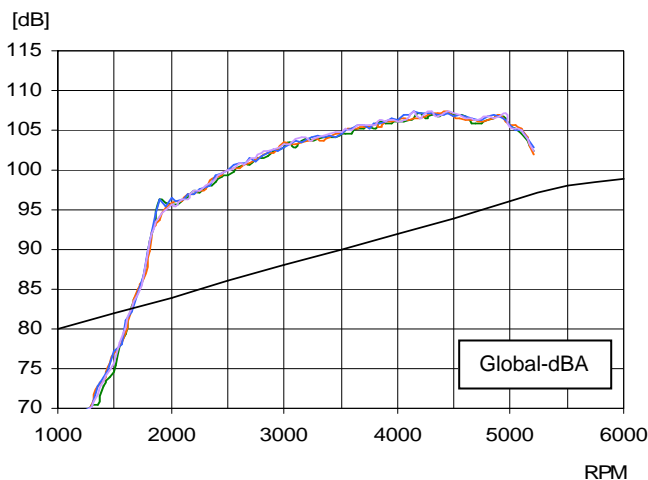
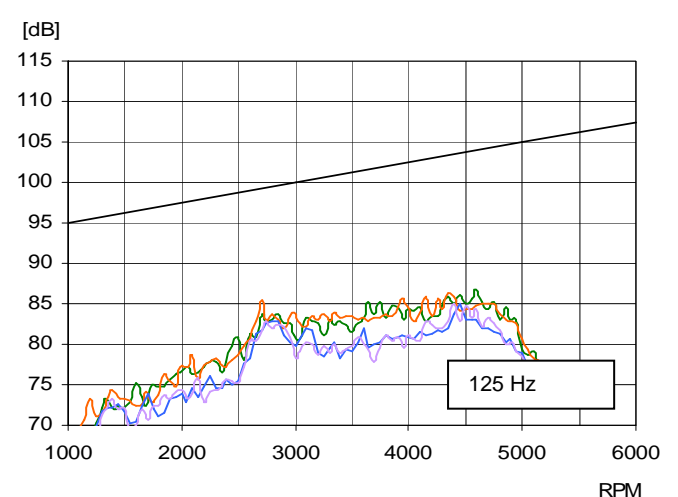
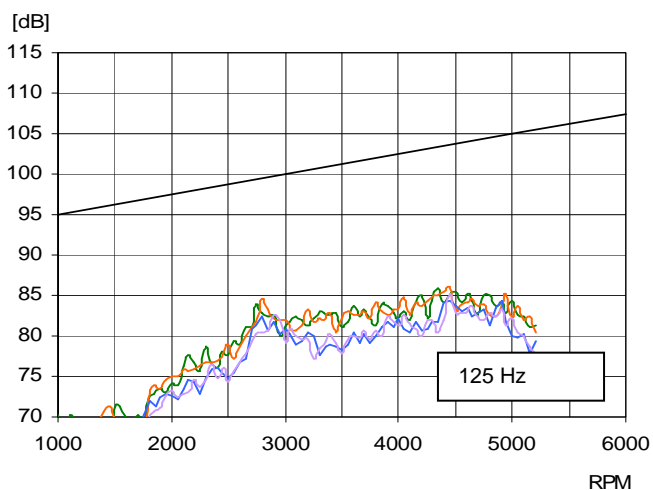
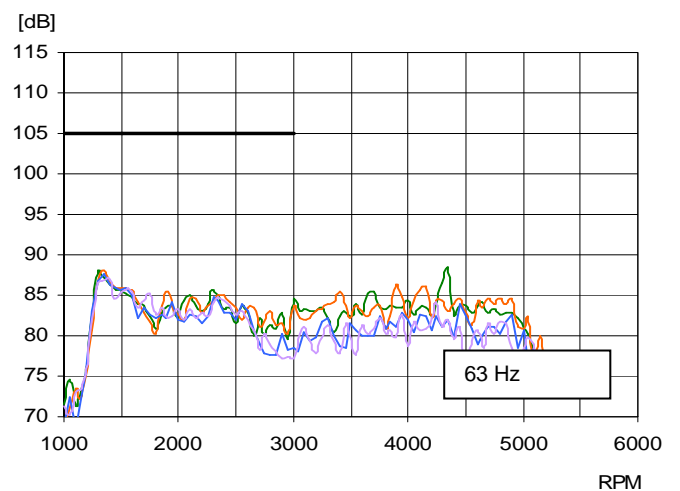
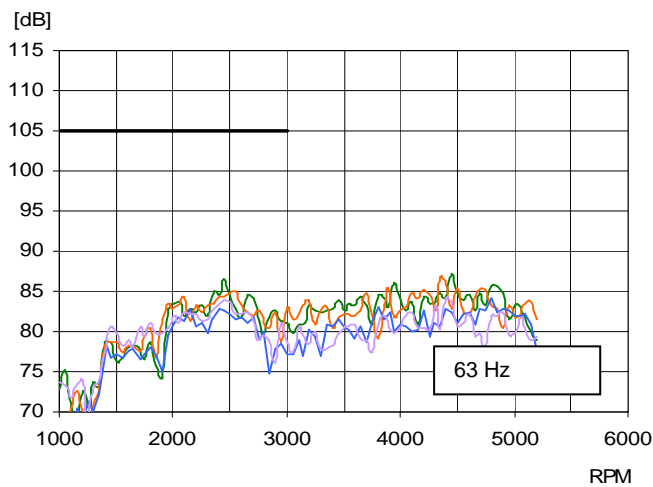
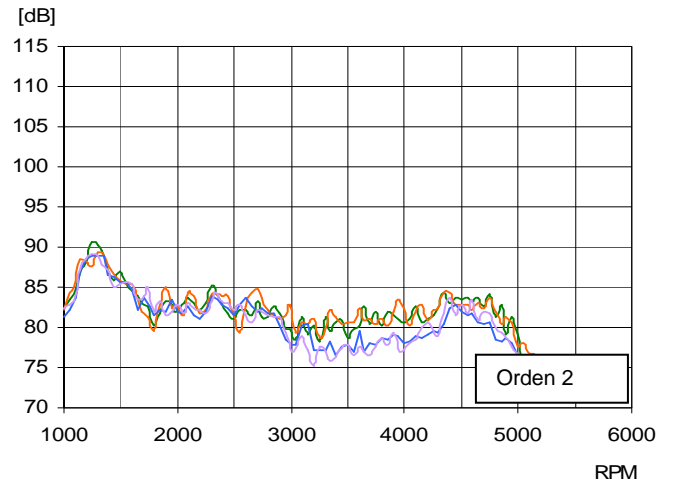
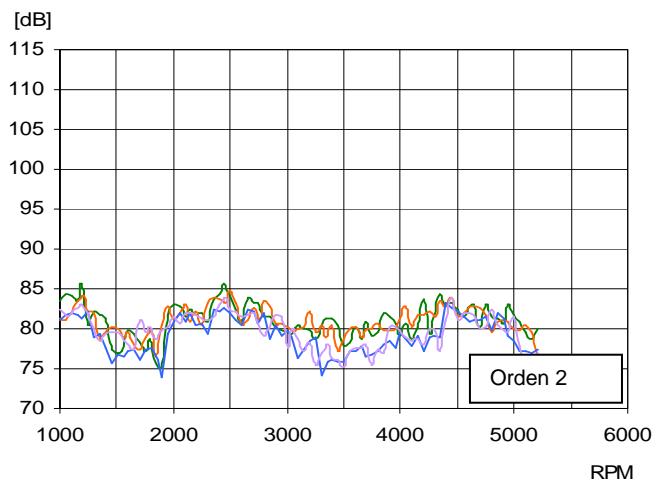


Fig 8.15 Comparativa: Ruido global. Subida (izda) y bajada (dcha)

En bajas frecuencias y orden 2, sí existe algo de diferencia, pero no es notable, siendo la máxima de 5dB. En todo caso, los niveles para Cola_alt_1 son algo más bajos prácticamente en todo el rango de revoluciones.



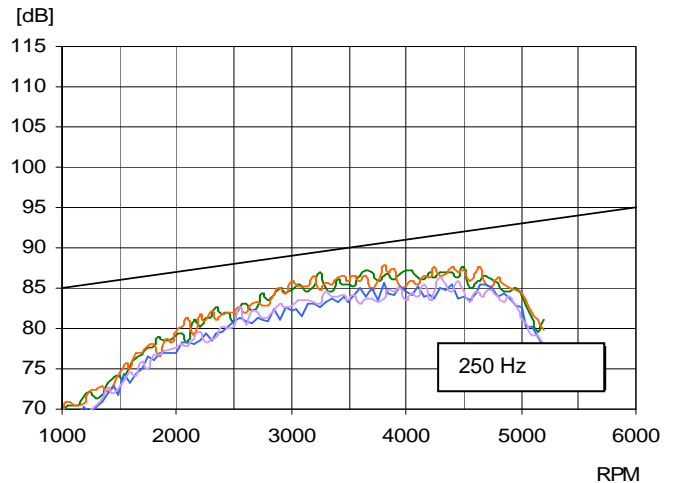
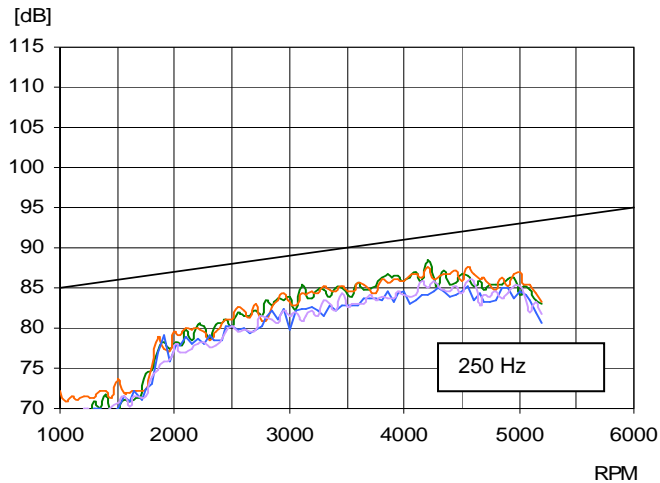
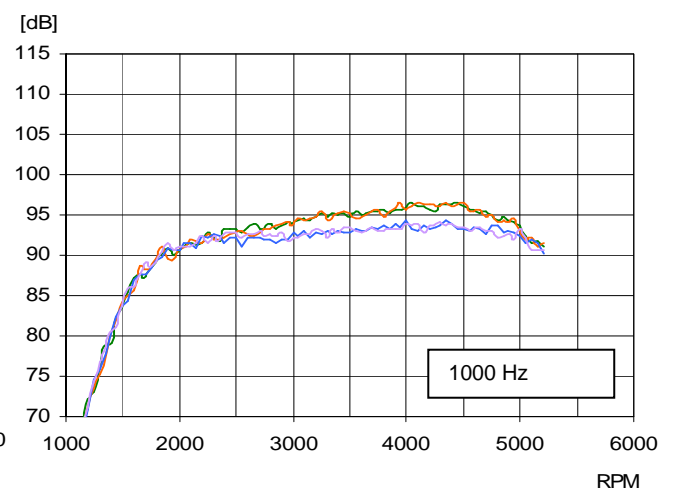
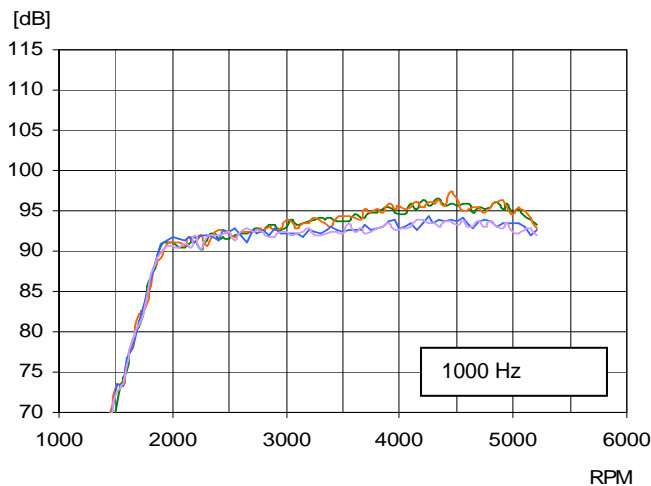
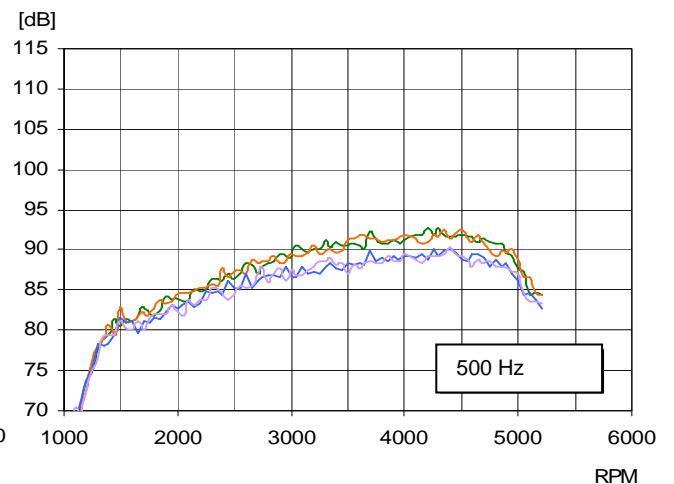
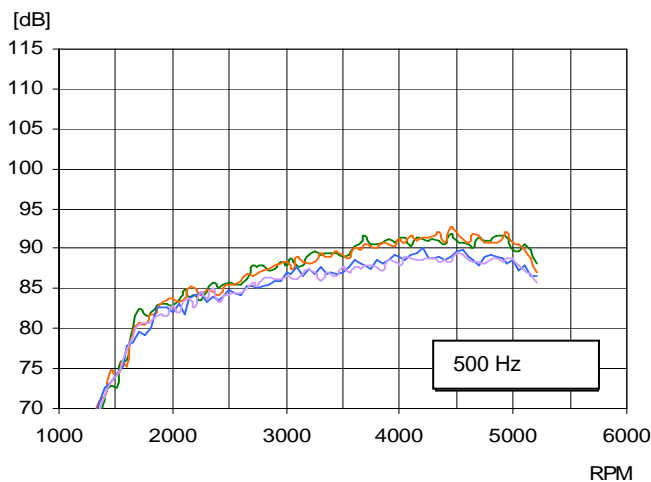


Fig 8.16 Comparativa: Orden 2 y frecuencias bajas. Subida (izda) y bajada (dcha)

En medias y altas frecuencias, el nivel es excesivo y muy similar para ambas muestras, con diferencias mínimas entre ambos tubos de cola, favorables al nuevo diseño a excepción de en la octava de 8000 Hz.



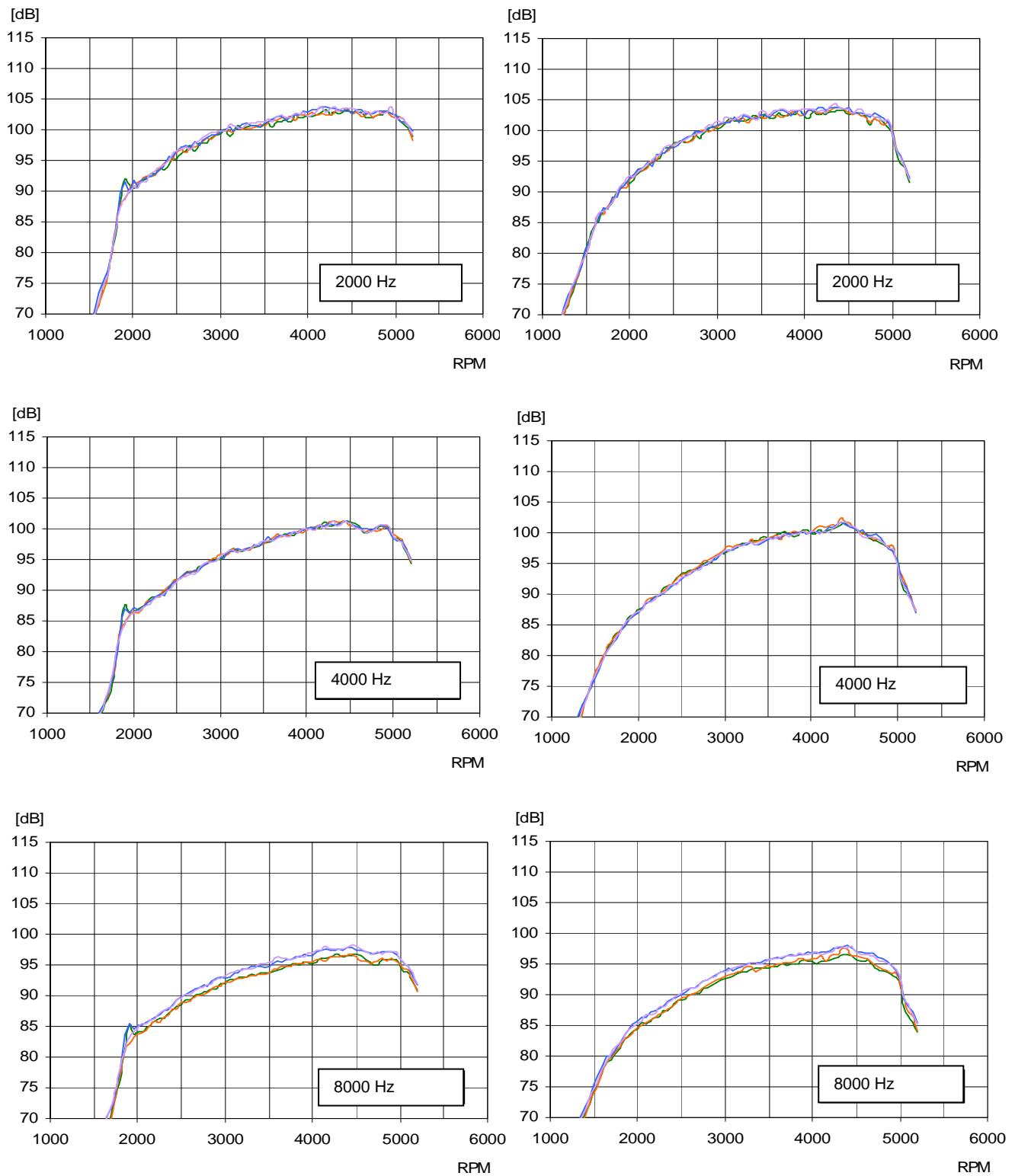


Fig 8.17 Comparativa: Frecuencias medias- altas. Subida (izda) y bajada (dcha)



8.5 CONCLUSIONES

Se ha realizado un ensayo de acústica para ruido de cola según el procedimiento TPA-T-001 (revisión 3), en banco de motores y con rampa de subida a plena carga (WOT).

El objetivo del mismo es comparar los niveles sonoros para el diseño del tubo de cola original y el diseño sometido a estudio, y descartar la aparición de efectos indeseados provocados por este último.

Se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los niveles de ruido obtenidos en el ensayo son excesivos, sobre todo en altas frecuencias (ruido de flujo) y superan ampliamente los límites objetivo, debido a la utilización de un motor que no corresponde al sistema de escape de referencia.
- Los valores recogidos para ambas muestras son similares, lo cual indica que no hay grandes diferencias debidas a la modificación del diseño del tubo de cola. Para ciertas frecuencias incluso los niveles sonoros mejoran con el nuevo diseño, de modo que el resultado es satisfactorio.
- La apreciación subjetiva del sonido emitido por el escape es de una sensación desagradable, con excesivo ruido de flujo que enmascara cualquier posible efecto surgido del nuevo diseño.
- Pese a la aparente repetitividad y fiabilidad de los resultados, y siendo los mismos satisfactorios, es conveniente la repetición del ensayo en condiciones más semejantes a las de servicio, para descartar la existencia de problemas indetectados.

9. LINEAS FUTURAS DE TRABAJO Y LECCIONES APRENDIDAS

El objetivo de este proyecto era validar el diseño de un tubo de cola que minimizase la transmisión de esfuerzos al resto del silencioso del sistema de escape ante un impacto por alcance trasero. Para ello se ha llevado a cabo una simulación del comportamiento de diversas alternativas y seleccionado la más adecuada. Posteriormente se ha realizado un ensayo de impacto que verifique los resultados de la simulación y se ha completado el estudio con un ensayo de acústica, puesto que se trata de uno de los requisitos fundamentales del sistema de escape. Los resultados obtenidos, expuestos anteriormente, son satisfactorios.

9.1 LINEAS FUTURAS DE TRABAJO

Como se ha podido comprobar, una de las alternativas de diseño estudiadas ha demostrado ser una buena opción, respondiendo adecuadamente ante el impacto, así como en el campo de la acústica. Los siguientes pasos en el desarrollo de este componente deben ser garantizar el cumplimiento del resto de requerimientos:

- **Coste:** para reducir el coste es necesario analizar por un lado la complejidad del diseño y por otro los materiales empleados, puesto que ambos factores van a ser determinantes en el proceso de producción.
- **Durabilidad:** el diseño no sólo ha de garantizar el correcto funcionamiento de un componente, sino también garantizarlo durante su periodo de vida útil. Por ello es necesario estudiar las zonas críticas y los modos de fallo y realizar nuevos ensayos que aseguren un buen comportamiento en fatiga por vibraciones, ante la corrosión o las altas temperaturas.

Resulta interesante así mismo estudiar posibles mejoras a introducir en el diseño atendiendo a situaciones particulares. Uno de los posibles problemas que se presenta es el desprendimiento del tubo exterior en caso de fallo de la soldadura tras el impacto.

Se podría evitar realizando unas sencillas modificaciones, consistentes en el ensanchamiento del extremo posterior del tubo interior y el estrechamiento del extremo anterior del tubo exterior:

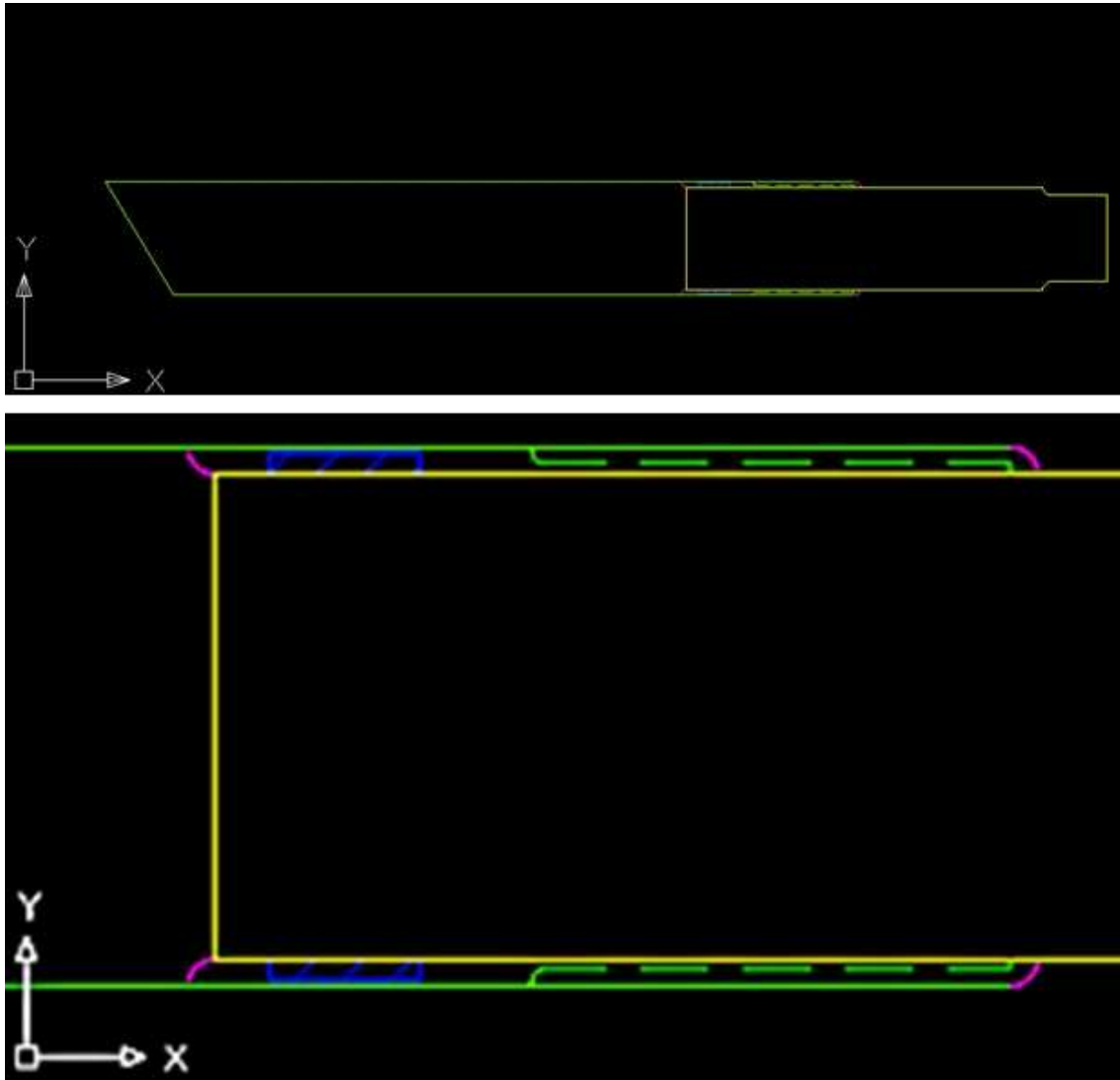


Fig 9.1 Modificación de tubos (rosa) para evitar desprendimiento tras el impacto

En cualquier caso, es necesario recordar que este estudio se ha llevado a cabo sobre un sistema de referencia determinado, y más adelante será necesario llevar a cabo la adaptación de este elemento a diversos sistemas de escape, teniendo en cuenta las peculiaridades de cada uno.

9.2 LECCIONES APRENDIDAS

Del desarrollo de este proyecto pueden extraerse valiosas lecciones a tener en cuenta en futuros trabajos.

Proceso de diseño y planificación

El desarrollo de un nuevo producto es un ciclo complejo en el cual una buena base de conocimientos y la experiencia son cualidades muy valiosas que facilitan todo el



proceso. Debido a la intervención de muchas personas, la buena comunicación es imprescindible para no cometer errores en un momento dado que comprometan todo el trabajo posterior. Además, dada la naturaleza cíclica del diseño son también fundamentales la previsión y el orden, para minimizar el número de bucles y así el coste temporal y económico.

En este caso, la planificación temporal establecida con anterioridad al estudio no ha podido cumplirse por un amplio margen. El tiempo invertido, en comparación con la previsión inicial, ha resultado ser mucho mayor por la necesidad de solucionar diversos problemas. A esto se suman periodos de inactividad ocasionados por diversos motivos, como pueden ser exceso de carga de trabajo en otros proyectos, averías, falta de materiales o de personal. Los retrasos se han acumulado fundamentalmente en el proceso de simulación y el ensayo de impacto, poniendo de manifiesto que se trata de un área de estudio poco trabajada.

Simulación

Esta ha sido la parte del estudio con mayor carga temporal. Aunque el problema de impacto había sido estudiado con anterioridad, las particularidades de los diseños en desarrollo han hecho necesario adaptar el método empleado. En cualquier caso, se puede concluir que para evitar errores y retrasos es necesario atender a los siguientes puntos:

- Asegurar que los modelos a importar para el preproceso son correctos
- Al realizar la malla, tener en cuenta las zonas críticas y el orden en que se realiza el mallado.
- Comprobar la validez del método y establecer procesos de optimización concisos.
- Tener en cuenta las discrepancias entre simulación y ensayo y conocer la sensibilidad del cálculo.

Ensayos

En cuanto a los dos ensayos realizados, de impacto y de acústica, los problemas derivan de la gran cantidad de personas y medios necesarios para su realización. Hay que tener en cuenta lo siguiente:



- La preparación previa del ensayo es muy importante y consume la mayor parte del tiempo y el esfuerzo. Hay que realizar planificaciones realistas.
- Los prototipos a ensayar deben ser producidos del modo más parecido a la posterior fabricación, y representar adecuadamente el diseño. Para ello es necesario que estén bien definidos previamente.
- Los elementos de seguridad, la adaptación de muestras al ensayo y los equipos de medición influyen en la disposición y pueden influir también en el resultado.
- Para asegurar la fiabilidad del resultado es necesario disponer de cuantas muestras sea necesario, garantizando la repetitividad.



10. BIBLIOGRAFÍA

- ABAQUS ANALYSIS USER'S MANUAL, 6.8 / 6.9. Simulia (Dassault Systemes)
- EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS. O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor. McGraw-Hill.
- FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA. Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders. Limusa 1990.
- LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA: FUENTES, EVALUACIÓN, EFECTOS Y CONTROL. Amando García Rodríguez. Sociedad Española de Acústica, 2006.

PÁGINAS WEB:

- www.euroncap.com
- www.crashtest.com
- www.ruidos.org
- www.euro-inox.org
- www.emcontechnologies.com (ahora www.faurecia.com)

Así mismo, se ha recibido multitud de documentación y apoyo por parte de todo el equipo del Centro Técnico de Emcon Technologies en Orcoyen.